

Министерство образования и науки, молодежи и спорта Украины

Донбасская государственная машиностроительная академия

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

**к практическим занятиям по дисциплине
«ТЕОРИЯ СВАРОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ»**

для студентов специальности 6.050504

«Технологии и оборудования сварки»

УТВЕРЖДЕНО

на заседании кафедры ОиТСП

Протокол № 20 от 05.06.2012г.

Краматорск 2012

УДК 621.791

Методические указания к практическим занятиям по дисциплине «Теория сварочных процессов» для студентов специальности 6.050504 «Технология и оборудование сварки» / Сост. Богуцкий А.А. – Краматорск: ДГМА, 2012. - с.

В методических указаниях содержатся задания и теоретические материалы, иллюстрирующие подход к решению задач применительно к конкретным сварочным условиям.

Составитель

А.А. Богуцкий, ассист.

Отв. за выпуск

В.М. Карпенко, доц.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1 Электрическая сварочная дуга.....	4
2 Термические недуговые и другие источники энергии.....	16
3 Физико-химические процессы при сварке плавлением.....	25
4 Металлургические процессы.....	37
Приложение А. Стандартная энтальпия образования и стандартная энтропия вещества....	56
Приложение Б. Термодинамический потенциал для реакций образования соединений из компонентов в стандартных состояниях.....	57
Приложение В. Коэффициенты для интерполяционных формул	59
Приложение Г. Параметры взаимодействия порядка для растворов H, C, N, O и S в жидком железе при 1873 К.....	60

ВВЕДЕНИЕ

Для соединения материалов, т.е. осуществления сварки, необходимо затратить энергию, которая идет на нагрев и расплавление материала, а в некоторых случаях и на образование металлических связей между свариваемыми поверхностями без их нагрева. Многообразие источников энергии обусловило появление большого количества способов сварки. Некоторые источники энергии рассмотрены в разделе 1, причем основное внимание уделено электрической дуге, поскольку электродуговые процессы сварки – доминирующие.

1 ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СВАРОЧНАЯ ДУГА

Электрическая дуга – один из видов электрического разряда в газах, характеризующийся высокими плотностью тока и температурой. Для осуществления электрического разряда газ между электродами должен, кроме нейтральных частиц, содержать определенное количество заряженных частиц. Роль заряженных частиц у большинства газов выполняют электроны и положительные ионы, хотя в некоторых случаях приходится считаться и с отрицательными ионами. Ионы и электроны в дуговом промежутке получают за счет процессов ионизации и эмиссии. Ионизация – это расщепление нейтральной частицы газа на ион и электрон. Для того чтобы из нейтрального атома или из молекулы получить две заряженные частицы, с внешней орбиты атома необходимо оторвать электрон. Оставшаяся частица, недосчитывающаяся электрона, будет являться положительным ионом. Для отрыва электрона необходимо затратить энергию, которая называется потенциалом ионизации. Для отделения второго и последующих электронов требуется затрата большей энергии. Поэтому существует понятие потенциала однократной ионизации. В табл.1.1 приведены величины потенциалов однократной ионизации для некоторых газов в вольтах.

Единицей потенциала ионизации является электрон-вольт (эВ), но в связи с тем, что заряд электрона постоянен и его можно принять за единицу, часто U_i выражают в вольтах, причем числовые значения в обеих размерностях совпадают.

Таблица 1.1 – Потенциал однократной ионизации U_i некоторых атомов и молекул

Элемент (вещество)	<i>H</i>	<i>H</i> ₂	<i>C</i>	<i>N</i>	<i>N</i> ₂	<i>O</i>	<i>O</i> ₂	<i>F</i>	<i>Na</i>	<i>Mg</i>	<i>Al</i>
U_i , В	13,5	15,4	11,22	14,5	15,8	13,3	13,5	16,9	5,11	7,61	5,95

Продолжение таблицы 1.1

Эл.	<i>Si</i>	<i>Ar</i>	<i>K</i>	<i>Ca</i>	<i>Mn</i>	<i>Fe</i>	<i>CO</i>	<i>CO</i> ₂	<i>H</i> ₂ <i>O</i>	<i>He</i>	<i>Ti</i>	<i>Ni</i>	<i>Cr</i>	<i>Co</i>
U_i , В	7,94	15,7	4,33	6,1	7,4	7,83	14,1	14,4	13,0	24,5	6,8	7,64	6,74	7,81

Газ, имеющий в своем составе, наряду с нейтральными частицами, электроны и ионы, считается ионизированным газом, а если, кроме того, количество отрицательных и положительных зарядов примерно одинаково (квазинейтральность), то такой газ называется *плазмой*. Для того чтобы признать газ плазмой, в нем должно содержаться достаточное количество заряженных частиц. Для характеристики ионизированного газа или плазмы введено понятие степени ионизации, т.е. отношения концентрации заряженных частиц (ионов) к исходной концентрации нейтральных частиц:

$$x = \frac{n_i}{n_0} \quad (1.1)$$

Степень ионизации может изменяться от 0 до 1. По некоторым литературным данным, при $x > 10^{-3}$ ионизированный газ может считаться плазмой.

Для определения степени ионизации газа индийским физиком Саха в 1921 г. предложено уравнение

$$\frac{x^2}{1-x^2} P = 2,4 \cdot 10^{-4} a^2 T^{5/2} \exp\left(-\frac{A_i}{kT}\right), \quad (1.2)$$

где P - давление газа, мм рт. ст.

Переводя давление в единицы СИ (Па), получаем

$$\frac{x^2}{1-x^2} = 3,2 \cdot 10^{-2} p^{-1} a^2 T^{5/2} \exp\left(-\frac{A_i}{kT}\right), \quad (1.3)$$

где p - давление газа, Па;

$a^2 = \frac{2g_i}{g_0}$ - квантовый коэффициент, образуемый из статических весов

электронов - (≈ 2), ионов g_i и нейтральных молекул g_0 ;

T - температура, К;

A_i - энергия ионизации, Дж; $A_i = \bar{e}U_i = 1,6 \cdot 10^{-19} U_i$;

k - постоянная Больцмана, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/°С.

Значения a^2 , вычисленные К.К. Хреновым согласно представлениям квантовой механики, для разных газов даны в табл.1.2.

Таблица 1.2 – Квантовый коэффициент для газов и паров

Газ	H	C	N	O	Na	Al	Si	Ar	K	Ca	Mn	Fe	He	Ti	Ni	Cr	Co
a^2	1	4/3	3/2	8/3	1	1	4/3	4	1	4	7/3	12/5	4	4/3	8/3	8/7	5/2

Расчеты по уравнению (1.3) могут быть выполнены для любых степеней ионизации, но следует помнить, что из-за допущений, принятых при выводе, их

точность понижается при приближении x к единице.

В сварочных дугах степень ионизации составляет несколько процентов, поэтому в левой части уравнения величина x^2 мала по отношению к единице. Можно принять $(1-x^2) \approx 1$. Тогда уравнение (1.3) переписывается так:

$$x^2 = 3,2 \cdot 10^{-2} p^{-1} a^2 T^{5/2} \exp\left(-\frac{Ai}{kT}\right) \quad (1.4)$$

или

$$x = 0,18 p^{-1/2} a T^{5/4} \exp\left(-\frac{Ai}{2kT}\right). \quad (1.5)$$

Экспоненту $\left(-\frac{Ai}{2kT}\right)$ принято представлять как $\exp\left(-\frac{5800U_i}{T}\right)$.

Тогда для сварочных дуг упрощенное уравнение Саха примет вид

$$x = 0,18 p^{-1/2} a T^{5/4} \exp\left(-\frac{5800U_i}{T}\right). \quad (1.6)$$

Такое упрощение уравнения (1.3) выполнено Г.И. Лесковым. Следует помнить, что уравнение (1.6) дает удовлетворительную точность при степенях ионизации, не превышающих одной десятой.

Уравнение Саха было выведено для одного газа. В сварочных условиях атмосфера дуги состоит из паров металлов, флюса или покрытия, защитных газов, т.е. представляет собой смесь газов. Уравнения для определения степени ионизации смеси газов в сварочной дуге не существует, поэтому расчеты значения x для реальных сварочных условий невозможны. В связи с этим ограничиваются вычислением величины, называемой *эффективным потенциалом ионизации смеси газов* U_0 и учитывающей потенциалы ионизации отдельных газов, входящих в смесь, применительно к условиям сварки по формуле В.В.Фролова:

$$U_0 = -\frac{T}{5800} \ln \sum_1^k v_i^{1/2} \exp\left(-\frac{5800U_i}{T}\right), \quad (1.7)$$

где k - количество газов в смеси;

$v_i = \frac{b_i}{b}$ - концентрация компонента в смеси;

b_i - массовая доля компонента в смеси, %;

b - масса всей смеси, %.

Из уравнения (1.7) следует, что эффективный потенциал ионизации в значительной мере определяется легко ионизируемым газом, причем для заметного

снижения U_0 не нужны большие концентрации элементов с низким потенциалом ионизации.

Различают несколько видов эмиссии: термоэлектронную, автоэлектронную, фотоэлектронную и вторичную. Термоэлектронная эмиссия протекает под действием высокой температуры, автоэлектронная - электрического поля, фотоэлектронная - лучистой энергии, вторичная - бомбардировки поверхности катода различными частицами, например положительными ионами. В результате протекания эмиссии возникает эмиссионный ток. Плоскость тока термоэлектронной эмиссии описывается уравнением Ричардсона – Дешмана, A/cm^2 :

$$j_{TЭ} = AT^2 e^{-\frac{\Phi}{kT}}, \quad (1.8)$$

где A - константа, теоретическое значение, $A = 120 A/(cm \cdot ^\circ C)^2$.
Опытные значения: для Fe - $A=60$; W- $A=70$; Th - $A=70$.

$$\Phi = \bar{e}\varphi \quad (1.9)$$

где φ - работа выхода, В;
 e - заряд электрона, $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл;
 k - постоянная Больцмана, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К.

Плотность тока автоэлектронной эмиссии может определяться по формуле Фаулера – Нордгейма, A/m^2 ,

$$j_{aэ} = 6,2 \cdot 10^{-6} \frac{E}{\varphi} \exp\left(-\frac{6,8 \cdot 10^9 \varphi^{3/2}}{E}\right), \quad (1.10)$$

где E - напряженность электрического поля, В/м.

На практике одновременно протекают процессы термо- и автоэлектронной эмиссии, поэтому плотность тока автотермоэлектронной эмиссии, A/cm^2 ,

$$j_{aT} = j_{Tэ} \exp \frac{4,39E^{1/2}}{T}, \quad (1.11)$$

где E - напряженность электрического поля, В/см.

Фотоэлектронную эмиссию в сварочных дугах можно объяснить тем, что в связи с низкой работой выхода кванты лучистой энергии способны выбивать электроны с поверхности эмиттера. Количественного описания этого процесса применительно к сварке пока не существует.

К.К. Хренов вывел простую зависимость для определения температуры сварочной дуги, связав ее с потенциалом ионизации газа. При ручной дуговой сварке плавящимся электродом формула имеет вид, К,

$$T \approx 800U_0. \quad (1.12)$$

На основании опытных данных, по аналогии с уравнением (1.12), для сварки под флюсом предложена зависимость, К,

$$T \approx 1100U_0. \quad (1.13)$$

При этом считают, что по высоте столба дуги температура постоянна. Теплота, выделяемая электрической дугой постоянного тока, зависит от режима сварки, Дж/с,

$$Q = I_{CB}U_D, \quad (1.14)$$

где Q - полная тепловая мощность дуги;

I_{CB} - сварочный ток;

U_D - напряжение дуги, В.

Некоторое количество мощности дуги Q теряется на теплообмен с окружающей средой и световое излучение, а в свариваемое изделие поступает лишь ее часть, называемая эффективной тепловой мощностью q_u , Дж/с,

$$q_u = \eta_u Q, \quad (1.15)$$

где η_u - эффективный КПД теплового источника,

Определенная часть тепловой мощности дуги передается катоду и аноду. Предложены формулы для расчета этих мощностей:

$$P_a = I_{CB}(U_a + \varphi_a), \quad (1.16)$$

$$P_k = I_{CB}(U_k + \varphi_k), \quad (1.17)$$

где P_a, P_k - мощность, передаваемая, соответственно, аноду и катоду;

U_a, U_k - анодное и катодное падение напряжения;

φ_a, φ_k - работа выхода анода и катода соответственно.

Из уравнений (1.16) и (1.17) следует, что мощности, выделяющиеся в приэлектродных областях, в значительной мере определяются катодным и анодным падением напряжения. Значения величин U_k и U_a в свою очередь зависят от потенциала ионизации дугового газа, причем введение легко ионизирующихся элементов сильно снижает U_k и слабо влияет на U_a . В результате P_k/P_a становится меньше единицы. Для практики данный вывод интересен, так как, например, можно обеспечить уменьшение доли присадочного металла в шве при сварке на прямой полярности. При большом потенциале ионизации газа в дуге катодное падение напряжения возрастает интенсивнее по сравнению с анодным, и в результате возможны случаи, при которых $P_k > P_a$.

При сварке на переменном токе полная тепловая мощность дуги несколько меньше, чем при сварке на постоянном, поскольку в формуле (1.14) появляется коэффициент, учитывающий несинусоидальность тока и напряжения. Указанный коэффициент всегда меньше единицы.

Задачи к разделу 1

1.1 Рассчитать по уравнению Саха (1.3) степень ионизации газа при атмосферном давлении для различных температур (табл.1.3). Построить график зависимости степени ионизации газа от температуры для каждого варианта.

Таблица 1.3

Вариант	Элемент	Температура, K
1	H	9000, 10000, 11000, 12000, 13000
2	C	8000, 9000, 10000, 11000, 12000
3	N	7000, 9000, 11000, 13000, 15000
4	O	6000, 8000, 10000, 12000, 14000
5	Na	5000, 5500, 6000, 6500, 7000
6	Al	5500, 6000, 6500, 7000, 7500
7	Si	5000, 6000, 7000, 8000, 9000
8	Ar	11000, 12000, 13000, 14000, 15000
9	K	5500, 6000, 6500, 7000, 7500
10	Ca	6000, 6500, 7000, 7500, 8000
11	Mn	6000, 6500, 7000, 7500, 8000
12	Fe	5000, 6000, 7000, 8000, 9000

1.2 Установить влияние давления газа на степень его ионизации при постоянной температуре. Давление принимать равным 10^1 , 10^2 , 10^3 , 10^4 , 10^5 Па. Расчет производить по уравнению Саха (1.3). Построить график зависимости степени ионизации газа от давления (табл.1.4).

Таблица 1.4

Показатель	Вариант											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Элемент	H	C	N	O	Na	Al	Si	Ar	K	Ca	Mn	Fe
Температура, K	11000	8000	12000	10000	5000	5000	7000	12000	5000	6000	6000	7000

1.3 По данным табл.1.5 определить влияние химических соединений, вводимых в покрытия или в флюсы и содержащих легко ионизируемые элементы, на элективный потенциал ионизации газовой смеси при дуговой сварке.

Таблица 1.5

Вариант	Вводимое соединение	T, K	Номер смеси	Концентрация компонента в газовой смеси							Суммарная концентрация элементов соединения после диссоциации (в расчет не вводить)
				Fe	CO_2	CO	H_2	H_2O	O	Ca	
1	CaO	5000	I	0,25	0,04	0,29	0,40	0,02	-	-	-
			II	0,25	0,04	0,28	0,39	0,02	0,01	0,01	0,02
			III	0,24	0,04	0,27	0,39	0,02	0,02	0,02	0,04
			IV	0,22	0,03	0,24	0,35	0,02	0,07	0,07	0,14
			V	0,18	0,03	0,20	0,28	0,01	0,15	0,15	0,30
2	CaO	6000		Fe	CO_2	CO	H_2	H_2O	O	Ca	-
			I	0,35	0,03	0,25	0,35	0,02	-	-	
			II	0,34	0,03	0,25	0,34	0,02	0,01	0,01	
			III	0,31	0,03	0,23	0,31	0,02	0,05	0,05	
			IV	0,28	0,02	0,20	0,28	0,02	0,10	0,10	
			V	0,21	0,02	0,15	0,21	0,01	0,20	0,20	
3	CaF ₂	5000		Fe	CO_2	CO	H_2	H_2O	F	Ca	-
			I	0,25	0,03	0,30	0,40	0,02	-	-	
			II	0,25	0,03	0,29	0,39	0,02	0,01	0,01	
			III	0,25	0,03	0,28	0,36	0,02	0,03	0,03	
			IV	0,24	0,02	0,27	0,35	0,02	0,05	0,05	
			V	0,20	0,02	0,18	0,28	0,02	0,15	0,15	
4	CaF ₂	5500		Fe	CO_2	CO	H_2	H_2O	F	Ca	

			I	0,30	0,02	0,26	0,39	0,03	-	-	-			
			II	0,30	0,02	0,24	0,37	0,03	0,02	0,02	0,04			
			III	0,30	0,02	0,22	0,33	0,03	0,05	0,05	0,10			
			IV	0,25	0,02	0,21	0,30	0,02	0,10	0,10	0,20			
			V	0,20	0,02	0,15	0,21	0,02	0,20	0,20	0,40			
5	Al ₂ O ₃	4000		<i>Fe</i>	<i>CO₂</i>	<i>CO</i>	<i>H₂</i>	<i>O₂</i>	<i>O</i>	<i>Al</i>	-			
			I	0,25	0,05	0,30	0,370	0,010	0,020	-				
			II	0,25	0,05	0,29	0,363	0,012	0,025	0,01				
			III	0,25	0,05	0,28	0,335	0,020	0,035	0,03				
			IV	0,24	0,05	0,25	0,325	0,025	0,050	0,06				
			V	0,21	0,04	0,22	0,175	0,065	0,130	0,16				
6	Al ₂ O ₃	4500		<i>Fe</i>	<i>CO₂</i>	<i>CO</i>	<i>H₂</i>	<i>O₂</i>	<i>O</i>	<i>Al</i>	-			
			I	0,40	0,04	0,25	0,310	-	-	-				
			II	0,40	0,04	0,24	0,303	0,002	0,005	0,01				
			III	0,40	0,04	0,22	0,270	0,010	0,020	0,04				
			IV	0,38	0,03	0,22	0,230	0,020	0,040	0,08				
			V	0,36	0,03	0,20	0,200	0,030	0,060	0,12				
7	K ₂ O+ +Na ₂ O	5000		<i>Fe</i>	<i>CO₂</i>	<i>CO</i>	<i>H₂</i>	<i>H₂O</i>	<i>O</i>	<i>Na</i>	<i>K</i>	-		
			I	0,30	0,02	0,28	0,38	0,02	-	-	-			
			II	0,30	0,02	0,26	0,36	0,02	0,02	0,01	0,01			
			III	0,30	0,02	0,25	0,33	0,02	0,04	0,02	0,02			
			IV	0,28	0,02	0,24	0,32	0,02	0,06	0,03	0,03			
V	0,26	0,01	0,22	0,30	0,01	0,10	0,05	0,05						
8	CaO+	4000		<i>Fe</i>	<i>CO₂</i>	<i>CO</i>	<i>H₂</i>	<i>H</i>	<i>H₂O</i>	<i>O₂</i>	<i>O</i>	<i>Mg</i>	<i>Ca</i>	

	+MgO		I	0,28	0,02	0,21	0,05	0,21	0,03	0,05	0,15	-	-	0,04
			II	0,28	0,02	0,18	0,05	0,20	0,03	0,05	0,17	0,01	0,01	0,08
			III	0,28	0,02	0,16	0,04	0,19	0,03	0,05	0,19	0,02	0,02	0,12
			IV	0,27	0,02	0,15	0,04	0,18	0,03	0,04	0,21	0,03	0,03	0,20
			V	0,25	-	0,12	0,04	0,17	0,03	0,04	0,25	0,05	0,05	
9	CaO+ +MgO	3500		<i>Fe</i>	<i>CO₂</i>	<i>CO</i>	<i>H₂</i>	<i>H</i>	<i>H₂O</i>	<i>O₂</i>	<i>O</i>	<i>Mg</i>	<i>Ca</i>	-
			I	0,20	0,08	0,22	0,08	0,15	0,14	0,06	0,07	-	-	
			II	0,20	0,07	0,20	0,08	0,14	0,14	0,06	0,09	0,01	0,01	
			III	0,20	0,07	0,18	0,08	0,14	0,12	0,06	0,11	0,02	0,02	
			IV	0,18	0,05	0,15	0,07	0,12	0,11	0,05	0,17	0,05	0,05	
			V	0,16	0,02	0,10	0,05	0,12	0,11	0,05	0,23	0,08	0,08	
10	CaCO ₃	4000		<i>Fe</i>	<i>CO₂</i>	<i>H₂</i>	<i>H</i>	<i>H₂O</i>	<i>CO</i>	<i>O₂</i>	<i>O</i>	<i>Ca</i>		
			I	0,60	0,05	0,07	0,25	0,03	-	-	-	-		
			II	0,60	0,04	0,07	0,23	0,03	0,01	0,01	-	0,01		
			III	0,60	0,04	0,06	0,21	0,03	0,02	0,01	0,01	0,02		
			IV	0,57	0,03	0,06	0,20	0,02	0,04	0,02	0,02	0,04		
			V	0,55	0,02	0,05	0,18	0,02	0,06	0,03	0,03	0,06		
11	CaCO ₃	3500		<i>Fe</i>	<i>CO₂</i>	<i>H₂</i>	<i>H</i>	<i>H₂O</i>	<i>CO</i>	<i>O₂</i>	<i>O</i>	<i>Ca</i>		
			I	0,50	0,10	0,10	0,15	0,15	-	-	-	-		
			II	0,50	0,09	0,10	0,14	0,14	0,01	0,01	-	0,01		
			III	0,50	0,09	0,09	0,13	0,13	0,02	0,01	0,01	0,02		
			IV	0,45	0,08	0,08	0,10	0,11	0,06	0,03	0,03	0,06		
V	0,40	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,05	0,05	0,10					
12	K ₂ O+	5500	I	<i>Fe</i>	<i>CO₂</i>	<i>CO</i>	<i>H₂</i>	<i>H₂O</i>	<i>O</i>	<i>Na</i>	<i>K</i>			

	+Na ₂ O		II	0,32	0,03	0,28	0,35	0,02	-	-	-	0,04
			III	0,32	0,03	0,27	0,32	0,02	0,02	0,01	0,01	0,08
			IV	0,32	0,03	0,25	0,30	0,02	0,04	0,02	0,02	0,20
			V	0,30	0,02	0,20	0,27	0,01	0,10	0,05	0,05	0,40
				0,27	0,02	0,14	0,16	0,01	0,20	0,10	0,10	

Построить график зависимости U_0 от содержания рассматриваемого соединения и сделать вывод о его полезности и целесообразных (с точки зрения ионизации дугового промежутка) концентрациях.

1.4 Определить плотность автоэлектронного тока эмиссии с железного катода по данным таблицы 1.6.

Таблица 1.6

Показатели	Вариант											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Напряженность поля E , В/м	$6 \cdot 10^8$	$6,5 \cdot 10^8$	$7 \cdot 10^8$	$7,5 \cdot 10^8$	$8 \cdot 10^8$	$9 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^9$	$1,5 \cdot 10^9$	$2 \cdot 10^9$	$3 \cdot 10^9$	$4 \cdot 10^9$	$5 \cdot 10^9$

1.5 Определить плотность тока автотермоэлектронной эмиссии при различных параметрах процесса. Построить график зависимости плотности тока от температуры катода или от напряженности поля по данным табл. 1.7.

Таблица 1.7

Показатели	Вариант											
	1	2	3	4	5	6						
Материал эмиттера (катада)	<i>Fe</i>											
Параметры процесса <i>T, K</i> и <i>E</i> , В/см	<i>T</i>	<i>E</i>	<i>T</i>	<i>E</i>	<i>T</i>	<i>E</i>	<i>T</i>	<i>E</i>	<i>T</i>	<i>E</i>	<i>T</i>	<i>E</i>
Величина параметров	3000	$6 \cdot 10^5$ $7 \cdot 10^5$ $8 \cdot 10^5$ $9 \cdot 10^5$ $1 \cdot 10^5$	2600 2700 2800 2900 3000	$6 \cdot 10^5$	3000	$1 \cdot 10^5$ $2 \cdot 10^5$ $3 \cdot 10^5$ $4 \cdot 10^5$ $5 \cdot 10^5$	2800 2850 2900 2950 3000	$1 \cdot 10^5$	2200 2400 2600 2800 3000	$2 \cdot 10^5$	2900	$8 \cdot 10^5$ $8,5 \cdot 10^5$ $9 \cdot 10^5$ $9,5 \cdot 10^5$ $10 \cdot 10^5$

Показатели	Вариант											
	7	8	9	10	11	12						
Материал эмиттера (катада)	<i>W</i>											
Параметры процесса <i>T, K</i> и <i>E</i> , В/см	<i>T</i>	<i>E</i>	<i>T</i>	<i>E</i>	<i>T</i>	<i>E</i>	<i>T</i>	<i>E</i>	<i>T</i>	<i>E</i>	<i>T</i>	<i>E</i>
Величина параметров	5700 5800 5900 6000 6100	$3 \cdot 10^5$	6100	$1 \cdot 10^5$ $2 \cdot 10^5$ $3 \cdot 10^5$ $4 \cdot 10^5$ $5 \cdot 10^5$	5550 5700 5850 6000 6150	$4 \cdot 10^5$	6150	$6 \cdot 10^5$ $7 \cdot 10^5$ $8 \cdot 10^5$ $9 \cdot 10^5$ $1 \cdot 10^5$	5300 5500 5700 5900 6100	$5 \cdot 10^5$	5000	$1 \cdot 10^5$ $2 \cdot 10^5$ $3 \cdot 10^5$ $4 \cdot 10^5$ $5 \cdot 10^5$

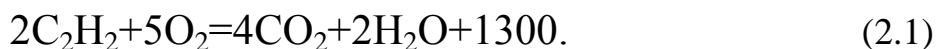
1.6 Определить тепловые мощности, выделяемые на катоде и аноде сварочной дуги. Представить их в виде долей полной тепловой мощности и построить гистограмму по данным таблицы 1.8.

Таблица 1.8

Вариант	Сила сварочного тока $I_{св}$, А	Напряжение дуги U_d , В	Материал катода	Материал анода	Катодное падение напряжения, В	Анодное падение напряжения, В
1	300	25	<i>Fe</i>	<i>Fe</i>	8	6
2	320	18	<i>V</i>	<i>W</i>	6	4
3	400	33	<i>Fe</i>	<i>Fe</i>	11	8
4	60	12	<i>W</i>	<i>Fe</i>	5	3
5	350	22	<i>W</i>	<i>Ti</i>	7	5
6	100	20	<i>Fe</i>	<i>Fe</i>	7	5
7	400	32	<i>Ti</i>	<i>Ti</i>	10	6
8	280	31	<i>Ti</i>	<i>Ti</i>	9	6
9	150	21	<i>Fe</i>	<i>Fe</i>	7	5
10	80	12	<i>W</i> лантанированный	<i>Pt</i>	5	3
11	120	13	<i>W</i> лантанированный	<i>Mo</i>	5	4
12	250	17	<i>W</i> лантанированный	<i>Ta</i>	6	4

2 ТЕРМИЧЕСКИЕ НЕДУГОВЫЕ И ДРУГИЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

Газовое пламя является источником энергии при газовой сварке и образуется при сгорании горючих газов в кислороде. В качестве горючего газа при сварке обычно используется ацетилен C_2H_2 , дающий наивысшую температуру (3100...3150 °С) по сравнению с другими газами. Полное сгорание ацетилена протекает по реакции, кДж/моль,



В этой формуле имеется в виду моль реагента, т.е. ацетилена. Моль (грамм-молекула) любого газа при нормальных условиях имеет объем 22,4 л.

По сравнению с электрической дугой газовое пламя – это низкотемпературный и менее сосредоточенный источник, однако положительное его качество –

возможность регулирования распределения теплоты по поверхности изделия. К тому же конструкции газовых горелок позволяют в широких пределах регулировать тепловую мощность пламени. Для этого горелки имеют сменные наконечники, регулирующие объемы образующихся газов. Полная тепловая мощность, Дж/с,

$$Q_{пл} = Q_n V_a = \frac{Q_n V_a}{3600}, \quad (2.2)$$

где Q_n - низшая теплотворная способность газа, Дж/л;

V_a - расход горючего газа, л/ч.

Для ацетилена $Q_n = 52794$ Дж/л, поэтому

$$Q_{пл} = \frac{52794 V_a}{3600} = 14,665 V_a. \quad (2.3)$$

Газовое пламя нагревает поверхность изделия вследствие процессов конвекции и излучения. При этом, естественно, часть теплоты теряется. Та часть мощности пламени, которая расходуется полезно и идет на нагрев металла, называется *эффективной мощностью пламени* q_u и является характеристикой наконечника горелки. Знание величин $Q_{пл}$ и q_u позволяет определять эффективный КПД процесса нагрева металла газовым пламенем:

$$\eta_u = \frac{q_u}{Q_{пл}}. \quad (2.4)$$

Необходимые данные для расчета η_u приведены в табл.2.1. Эффективный КПД процесса нагрева уменьшается с увеличением мощности пламени.

Таблица 2.1 – Тепловые характеристики кислородно-ацетиленового пламени сварочной горелки

Тепловая характеристика	Номер наконечника в горелке						
	1	2	3	4	5	6	7
Расход ацетилена V_a , л/ч	150	250	400	600	1 000	1 700	2 600
Эффективная мощность пламени q_u , Дж/с	1 592	2 514	3 017	3 855	5 321	7 332	9 428
Наибольший удельный тепловой поток q_{max} , Дж/(см ² ·с)	197	281	302	344	390	465	511
Коэффициент сосредоточенности удельного теплового потока κ , 1/см ²	0,39	0,35	0,31	0,28	0,23	0,20	0,17

Изменение интенсивности ввода теплоты в свариваемое изделие при удалении от центра пятна нагрева подчиняется закону Гаусса, т.е. закону нормального распределения. Наибольшее количество теплоты вводится пламенем в центр пятна нагрева, и эта величина обычно называется *наибольшим удельным тепловым потоком* q_{max} (см. табл. 2.1). По мере удаления от центра пятна нагрева плотность теплового потока уменьшается, и ее зависимость от расстояния r выражается уравнением

$$q_r = q_{max} e^{-kr^2}, \quad (2.5)$$

где q_r - плотность теплового потока в искомой точке пятна нагрева, Дж/(см²·с);

k - коэффициент сосредоточенности удельного теплового потока, 1/см²;

r - расстояние от центра пятна нагрева, см.

Из уравнения 2.5 следует, что с увеличением q_{max} диаметр пятна нагрева увеличивается.

Электрошлаковый источник. Полная тепловая мощность электрошлакового процесса, Дж/с,

$$Q = I_{cv} U, \quad (2.6)$$

где I_{cv} - сила тока, А;

U - напряжение сварки, В.

Часть теплоты Q расходуется бесполезно на излучение и нагрев ползунов, причем эффективный КПД составляет примерно 0,78... 0,83. Тогда эффективная мощность источника

$$q_u = \eta_u Q = (0,78 \dots 0,83) Q. \quad (2.7)$$

Эффективная мощность q_u расходуется на плавление электродного металла и флюса, которые, в свою очередь, передают эту теплоту свариваемому металлу.

Н.Н. Рыкалин предложил считать, что при электрошлаковой сварке теплота свариваемому металлу передается тремя источниками. «Металлический источник» действует по границе «жидкий металл - жидкий шлак», и его мощность q_m определяется количеством теплоты, содержащейся в расплавленном электродном металле, т.е.

$$q_m = V_{cv} f \delta \rho S, \quad (2.8)$$

где V_{cv} - скорость сварки, см/с;

f - зазор, см;

δ - толщина свариваемого металла, см;

ρ - плотность металла, г/см³;

S - энтальпия расплавленного электродного металла при температуре шлака в активной зоне, Дж/г.

Два "шлаковых источника" с суммарной мощностью $q_{ш}$ отражают тепловое воздействие шлаковой ванны на каждую кромку свариваемого металла. Мощность "шлаковых источников" определяется как разность эффективной мощности и мощности "металлического источника":

$$q_{ш} = q_u - q_m. \quad (2.9)$$

Приведенные соотношения позволяют рассчитывать количество теплоты, вводимое в металл шлаковой ванной и электродом.

Электронный луч. При электронно-лучевой сварке нагрев металла и его плавление осуществляются с помощью пучка электронов, получаемого в специальной электронной пушке. В рабочем пространстве пушки необходим вакуум, поскольку в противном случае неизбежны столкновения электронов с молекулами остаточных газов, что приводит к нарушению направленного движения электронов. Для фокусирования пучка электронов в пушке используется система диафрагм и магнитных линз. Вследствие фокусирования электронного луча на обрабатываемой поверхности можно получить пятно малых размеров с высокой удельной мощностью в нем. Эффективность процесса сварки зависит от удельной мощности в пятне нагрева. Под пятном нагрева понимается площадь поперечного сечения электронного пучка на поверхности свариваемой детали. Диаметр пятна, образуемого электронным лучом,

$$d = S_0 \left(\frac{I}{U} \right)^{3/8}, \quad (2.10)$$

где S_0 - постоянная электронно-оптической системы.

$$S_0 = \left[2^{2/3} k / (\pi \bar{e}) C^{2/3} f_0^{2/3} T / j \right]^{3/8} \quad (2.11)$$

где k - постоянная Больцмана, Дж/°С;

\bar{e} - элементарный заряд электрона, $\bar{e} = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл;

C - безразмерная постоянная сферической аберрации линзы или системы линз;

f_0 - фокусное расстояние, см;

T - температура катода, К;

j - сила тока эмиссии с катода, А/см²;

I - сила тока, А;

U - ускоряющее напряжение, В.

Удельная мощность в пятне нагрева, Вт/см²,

$$q = \frac{IU}{\pi d^2 / 4}. \quad (2.12)$$

Электроны пучка, достигая поверхности металла, не прекращают свое движение, а проникают вглубь вещества. Глубина проникновения электронов невелика (несколько десятков микрон), но важна, поскольку торможение электронов сопровождается выделением тепловой энергии. Длина пути электронов в веществе, см,

$$h = 2,1 \cdot 10^{-11} U^2 / \rho , \quad (2.13)$$

где ρ - плотность вещества, г/см³.

Данные о плотностях некоторых металлов приведены в табл.2.2.

Таблица 2.2 - Плотности металлов

Металл	<i>Al</i>	<i>Ti</i>	<i>V</i>	<i>Cr</i>	<i>Mn</i>	<i>Fe</i>	<i>Co</i>	<i>Ni</i>	<i>Zr</i>	<i>Nb</i>	<i>Mo</i>	<i>W</i>
Плотность, г/см ³	2,7	4,5	6,02	6,9	7,4	7,88	8,6	8,8	6,5	12,7	10,2	19,5

Лазерное излучение. В качестве источника нагрева материалов могут применяться лазеры - квантовые генераторы, преобразующие электрическую, световую, тепловую или химическую энергию в монохроматическое излучение электромагнитных волн. Электромагнитное излучение во многих случаях проявляет корпускулярную природу и представляет собой последовательность дискретных порций энергии, называемых фотонами.

Энергия фотона

$$E = \frac{hc}{\lambda} , \quad (2.14)$$

где h – постоянная Планка, $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ Дж·с;

c – скорость света в вакууме, $c = 299\,776$ км/с $\approx 3 \cdot 10^{10}$ см/с;

λ – длина волны излучения, мкм (1 мкм = 10^{-6} м). Для расчетов по формуле (2.14) длину волны удобнее брать в сантиметрах.

Излучателями в лазерах могут быть твердые тела, в том числе полупроводники (рубин, арсенид галлия и др.), жидкости (растворы оксида неодима, красители и др.), газы и газовые смеси (водород, углекислый газ, аргон и др.). Лазеры с полупроводниковым излучателем имеют самый высокий КПД (до 70%). В табл.2.3 приведены длины волн излучения технологических лазеров с различными излучателями.

Таблица 2.3 – Длины волн излучения технологических лазеров

Тип лазера	Азотный (ультра-фиолетовый)	Гелий-неоновый	На арсениде галлия	Рубиновый	На стекле с неодимом	На CO ₂
Длина волны излучения, мкм	0,3	0,6	0,9	0,7	1,06	10,6

Эффективность лазера как источника нагрева зависит от того, насколько удастся сфокусировать излучение на фокальном пятне. Чем меньше диаметр фокального пятна на нагреваемом материале, тем выше плотность мощности излучения. В некоторых случаях радиус фокального пятна описывается приближенным уравнением

$$r_s \approx \frac{F\lambda}{D} \approx \lambda F_0, \quad (2.15)$$

где D - диаметр, ограничивающий пучок апертуры;

F - фокусное расстояние безаберрационной линзы.

В справочнике Н.Н. Рыкалина, А.А. Углова и др. указывается, что поскольку отношение F/D не бывает много меньше единицы, то радиус фокального пятна сопоставим с длиной волны λ .

Зависимость напряженности электромагнитного поля E и интенсивности излучения q от радиуса r_s описывается формулами:

$$E = E_0 \exp(-r_s^2 / \omega^2), \quad (2.16)$$

$$q = q_0 \exp(-2r_s^2 / 10^2), \quad (2.17)$$

где E_0 - напряженность электромагнитного поля в центре пучка;

ω - радиус гауссова пучка (радиус, на котором интенсивность излучения снижается в e^2 раз по сравнению с интенсивностью в центре);

q_0 - интенсивность излучения в центре пучка.

При анализе лазерного излучения допускают два вида пространственного распределения плотности потока: нормальное (гауссово) и равномерное по пятну нагрева. В случае нормального распределения плотности потока пользуются выражением

$$q = q_0 e^{-kr^2}, \quad (2.18)$$

где q_0 - максимальная плотность потока;

k - коэффициент сосредоточенности, определяющий степень «остроты»

пространственного распределения источника теплоты, см^2 ;

r - радиальная координата, см ; $r = \sqrt{x^2 + y^2}$.

Трущийся контакт. При сварке трением необходимая теплота выделяется в трущемся контакте (плоский источник) между двумя деталями. Мощность тепловыделения, кДж/с ,

$$Q \approx 0,5 \cdot 10^3 / 3 - \kappa \bar{P}_n V_r S f, \quad (2.19)$$

где κ - постоянная, для низкоуглеродистых сталей $\kappa = 1,7$;

\bar{P}_n - давление нагрева, МПа ;

V_r - линейная скорость на периферии поверхности трения, м/с ,

$$V_r = \frac{\pi d n}{1000}, \quad (2.20)$$

где d - диаметр заготовки, мм ;

n - частота вращения, с^{-1} ;

S - площадь сечения заготовки, м^2

f - коэффициент трения, $f = A/V_r^\kappa$;

A - постоянная, для низкоуглеродистых сталей $A = 0,18$.

Энергия взрыва. При сварке взрывом металл в зоне соударения подвергается всестороннему неравномерному сжатию. Давление сжатия для обеспечения качественного соединения металлов должно достигать определенного значения, зависящего от прочности материала. Давление в зоне соударения зависит от скорости соударения свариваемых заготовок, которая при сварке взрывом параллельно расположенных пластин определяется по зависимости

$$V = D \sqrt{\frac{h \rho_{BB}}{4 \delta \rho_v}}, \quad (2.21)$$

где D - скорость детонации взрывчатого вещества (ВВ);

h - расстояние между пластинами, мм ;

ρ_{BB} - плотность ВВ, кг/м^3 ;

δ - толщина метаемой пластины, мм ;

ρ_v - плотность метаемой пластины, кг/м^3 .

В качестве ВВ чаще всего применяют аммонит, скорость детонации которого 5 км/с , плотность 1000 кг/м^3 .

При известной скорости соударения по специальным таблицам может быть определено среднее давление на фронте пластической волны сжатия. Как правило, минимальные значения давления должны на порядок превышать предел текучести свариваемых металлов.

Задачи к разделу 2

2.1 Определить время, в течение которого при газовой сварке количество выделившейся теплоты достигнет заданного значения.

Таблица 2.1

Показатели	Вариант											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Расчетное кол-во теплоты, кДж	300	350	500	600	1000	1100	2000	2200	3000	4000	5000	7000
Номер наконечника горелки	1	1	2	2	3	3	4	4	5	5	6	7

2.2 Проследить за изменением эффективного КПД η_u процесса нагрева металла газовым пламенем при возрастании расхода ацетилена. Построить график зависимости η_u от расхода ацетилена.

Таблица 2.2

Показатели	Вариант											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Номер наконечника горелки	1	2	1	2	3	5	3	1	4	2	1	2
	3	4	2	3	4	6	5	3	5	3	5	4
	7	7	3	4	5	7	7	5	6	5	7	6

2.3 Определить плотность теплового потока газового пламени на различных расстояниях от центра пятна нагрева. Построить кривую распределения плотности теплового потока, причем по оси абсцисс откладывать значения r по обе стороны от нуля.

Таблица 2.3

Показатели	Вариант											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Номер наконечника горелки	1	2	3	4	5	6	7	1	3	5	6	7
Расстояние от центра пятна r , см	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,5	1,0	1,0	0,5	1,0	1,0	1,0	0,8	0,8	0,5	1,5	1,5
	1,0	1,5	2,0	1,0	2,0	2,0	2,5	1,6	1,5	1,5	2,5	3,0
	1,5	2,0	3,0	2,0	3,0	3,0	4,0	2,0	2,5	2,5	3,5	4,0
	2,5	3,0	3,5	3,5	4,0	4,0	5,0	2,7	3,3	3,7	4,5	5,5

2.4 Определить массовые доли (%) эффективной тепловой мощности при электрошлаковой сварке низкоуглеродистых сталей на заданных режимах, вносимые в основной металл электродной проволокой и шлаковой ванной. При расчете принять: плотность низкоуглеродистой стали - $7,8 \text{ г/см}^3$; теплосодержание расплавленного электродного металла – $1\,400 \text{ Дж/г}$.

Таблица 2.4

Величина	Вариант											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Толщина металла, мм	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	145	150
Зазор, мм	19	20	20	21	22	22	23	23	23	24	24	25
Сила тока, А	450	500	600	675	700	700	710	720	740	760	780	800
Напряжение сварки, В	44	44	45	46	47	48	48	49	49	50	50	50
Скорость сварки, м/ч	1,5	1,4	1,4	1,3	1,2	1,1	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5

2.5 Определить влияние ускоряющего напряжения на диаметр пятна d электронного пучка при определенной постоянной электронно-оптической системе S_o . Построить график зависимости диаметра от значения ускоряющего напряжения.

Таблица 2.5

Величина	Вариант											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
S_o	73	77	71	80	74	78	70	79	75	72	76	68
I , мА	31	27	34	25	30	26	35	25	29	33	28	40
U , кВ	40	41	42	40	41	48	52	44	41	43	39	40
	45	43	44	43	44	51	54	48	45	47	42	41
	50	45	46	46	47	54	56	52	49	51	45	42
	55	47	48	49	50	57	58	56	53	55	48	43
	60	49	50	52	53	60	60	60	57	59	51	44

2.6 Определить глубину проникания электронов пучка в металл при электронно-лучевой сварке. Ускоряющее напряжение 150 кВ.

Таблица 2.6

Показатели	Вариант											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Металл	<i>Al</i>	<i>Ti</i>	<i>V</i>	<i>Cr</i>	<i>Mn</i>	<i>Fe</i>	<i>Co</i>	<i>Ni</i>	<i>Zr</i>	<i>Nb</i>	<i>Mo</i>	<i>W</i>

2.7 Определить энергию фотона E излучения трех различных лазеров. Построить гистограмму, в которой по оси ординат откладывается энергия фотона.

Таблица 2.7

Вариант	Типы лазеров
1	Азотный; на арсениде галлия; на стекле с неодимом
2	Гелий-неоновый; рубиновый; на CO ₂
3	Азотный; гелий-неоновый; на арсениде галлия
4	Гелий-неоновый; на арсениде галлия; рубиновый
5	На арсениде галлия; рубиновый; на стекле с неодимом
6	Рубиновый; на стекле с неодимом; на CO ₂
7	Азотный; рубиновый; на стекле с неодимом
8	Гелий-неоновый; на арсениде галлия; на стекле с неодимом
9	На арсениде галлия; рубиновый; на CO ₂
10	Рубиновый; на стекле с неодимом; азотный
11	Азотный; на арсениде галлия; на CO ₂
12	Гелий-неоновый; на стекле с неодимом; на CO ₂

2.8 Определить мощность плоского источника теплоты при изменении одного из параметров режима сварки трением низкоуглеродистых цилиндрических стержней. Построить график зависимости мощности источника от исследуемого параметра.

Таблица 2.8

Показатели	Вариант											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Диаметр заготовки, мм	18	17,7	18,5	18,2	38	39	40	41	9	9,5	10	10,5
	19	18,7	19,5	19,2								
	20	19,7	20,5	20,2								
	21	20,7	21,5	21,2								
Частота вращения, с ⁻¹	23	24	25	26	14	14,2	14,5	14,7	48	49	50	51
					15	15,2	15,5	15,7				
					16	16,2	16,5	16,7				
					17	17,2	17,5	17,7				

Продолжение таблицы 2.8

Показатели	Вариант											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Давление нагрева, МПа	48	49	50	51	95	97	100	102	39	38,5	38,3	38,7
									40	39,5	39,3	39,7
									41	40,5	40,3	40,7
									42	41,5	41,3	41,7

2.9 Рассчитать скорость соударения свариваемых пластин при сварке взрывом с использованием в качестве ВВ аммонита. Метаемая пластина изготов-

лена из хромоникелевой стали плотностью 7 820 кг/м³.

Таблица 2.9

Показатели	Вариант											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Расстояние между пластинами, мм	15	15	11	12	13	14	16	17	18	19	20	21
Толщина метаемой (верхней) пластины, мм	10	5	6	7	8	9	4	5	6	7	8	10

3 ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ СВАРКЕ ПЛАВЛЕНИЕМ

При сварке плавлением основной и электродный металлы расплавляются, перегреваются, смешиваются, взаимодействуют со шлаковой и газовой фазами, и после этого металл шва кристаллизуется. Следовательно, в сварочной ванне протекают высокотемпературные химические процессы.

Известно, что химическое равновесие при сварке не достигается. Однако само понятие химического равновесия при анализе металлургических процессов необходимо, поскольку оно позволяет судить о направлении протекающих химических реакций, ибо любая термодинамическая система стремится к равновесию. В случае достижения химического равновесия между концентрациями веществ реакции устанавливается зависимость, которая называется *константой равновесия* K . Константа равновесия химической реакции в современном понимании представляет собой отношение, в числителе которого находится произведение концентраций веществ, получающихся в результате реакции, а в знаменателе - произведение концентраций исходных веществ. Например, для реакции $Fe + MnO = FeO + Mn$ константа равновесия

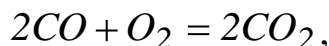
$$K_N = \frac{FeO Mn}{Fe MnO}. \quad (3.1)$$

Индекс N у константы равновесия означает, что концентрация веществ выражена через молярные доли. В тех случаях, когда в формуле фигурируют только парциальные давления, константу обозначают K_p , а если только активность - то K_a . Часто в выражение константы наряду с молярными долями входят парциальные давления или активности. В этом случае константу равновесия принято не

обозначать индексом. Если вещества, входящие в выражение константы равновесия, имеют молярную долю, парциальное давление или активность, равную единице, то они опускаются. Согласно этому в выражении (3.1) может быть опущено железо Fe , так как его молярная доля близка к единице, и выражение приобретает вид

$$K_n = \frac{FeO Mn}{MnO} . \quad (3.2)$$

В тех случаях, когда в реакции участвует несколько молекул одного вещества, число, характеризующее количество молекул, служит показателем степени для этого вещества в выражении константы равновесия. Примером может быть реакция образования углекислого газа



для которой константа равновесия принимает вид

$$K_p = \frac{P_{CO_2}^2}{P_{CO}^2 \cdot P_{O_2}} . \quad (3.3)$$

Для гетерогенных реакций с участием чистых конденсированных веществ и газов константа равновесия выражается через парциальные давления газообразных веществ. В качестве примера можно взять реакцию разложения мрамора



для которой $K_p = P_{CO_2}$.

Следует отметить, что давление единственного газообразного вещества, образующегося при диссоциации сложного соединения, называется *упругостью диссоциации данного соединения*. Таким образом, константа равновесия реакции (3.4) численно равна упругости диссоциации мрамора.

Константа равновесия имеет единственное значение для каждой реакции при определенной температуре. Если в равновесной системе изменить концентрацию какого-либо вещества при неизменных прочих параметрах, возникает процесс, стремящийся вернуть систему к равновесию.

Величина константы равновесия может быть определена как расчетным путем, так и экспериментально. Расчетный метод основан на использовании уравнения Вант - Гоффа, которое может быть представлено в виде

$$\ln K - \frac{\Delta G_T^0}{RT} , \quad (3.5)$$

где ΔG_T^0 - стандартный изобарный потенциал (энергия Гиббса);

R - газовая постоянная.

Значение стандартного изобарного потенциала для заданной температуры

определяется по уравнению Гиббса - Гельмгольца:

$$\Delta G^0_T = \Delta H^0_T - T \cdot \Delta S^0_T, \quad (3.6)$$

и тогда формула (3.5) может быть записана так:

$$\lg K = -\frac{\Delta H^0_T}{2,3RT} + \frac{\Delta S^0_T}{2,3R}, \quad (3.7)$$

где ΔH^0_T - разность энтальпий вещества при стандартном давлении $1,013 \cdot 10^5$ Па и температуре T ;

ΔS^0_T - разность энтропий вещества при тех же условиях.

Разности энтальпий и энтропий при стандартной температуре определяются по уравнениям:

$$\Delta H^0_{298} = \sum_i (n_i \cdot \Delta H^0_{i, \text{кон}}) - \sum_j (n_j \Delta H^0_{j, \text{исх}}); \quad (3.9)$$

$$\Delta S^0_{298} = \sum_i (n_i \cdot S^0_{i, \text{кон}}) - \sum_j (n_j S^0_{j, \text{исх}}), \quad (3.10)$$

где n_i, n_j - число молей, участвующих в реакции;

$\Delta H_{\text{кон}}$ - энтальпия образования вещества, получающегося в результате протекания химической реакции при стандартных условиях;

$\Delta H_{\text{исх}}$ - энтальпия образования исходного вещества при стандартных условиях;

$S^0_{\text{кон}}$ - энтропия вещества, получающегося в результате протекания химической реакции при стандартных условиях;

$S^0_{\text{исх}}$ - энтропия исходного вещества при стандартных условиях.

Значения ΔH^0 и S^0 для некоторых веществ приведены в приложении А. При расчетах следует помнить, что энтальпия простых веществ (Fe, Mn, O_2, N_2 и др.) равна нулю. Существуют приближенные методы расчета энергии Гиббса. По формуле Улиха:

$$\Delta G^0_T = \Delta H^0_{298} - T \Delta S^0_{298} - \Delta C_{p,298} T \left(\ln \frac{T}{298} + \frac{298}{T} - 1 \right), \quad (3.11)$$

где $\Delta C_{p,298}$ - разность сумм теплоемкостей продуктов реакции и исходных веществ.

Метод Улиха, как и другие приближенные способы, применяется в тех случаях, когда важна не величина конечного результата, а его порядок.

Для тех случаев, когда заданная температура невелика и, во всяком случае, ниже температуры фазовых превращений, уравнение (3.7) имеет вид

$$\lg K = -\frac{\Delta H^0_{298}}{2,3RT} + \frac{\Delta S^0_{298}}{2,3R}. \quad (3.12)$$

Поскольку разности энтальпий ΔH^0_{298} и энтропии ΔS^0_{298} известны для большинства веществ, то уравнение (3.12) удобно представить в виде

$$\lg K = \frac{A}{T} + B, \quad (3.13)$$

$$\text{где } A = -\frac{\Delta H^0_{298}}{2,3R}; \quad B = \frac{\Delta S^0_{298}}{2,3R}. \quad (3.14)$$

Решая уравнение (3.12), необходимо знать термодинамические функции ΔH^0 и S^0 химических веществ и соединений, участвующих в реакции. Такие данные для некоторых веществ представлены в приложении А. Порядок расчета следующий. Прежде всего, для исследуемой реакции определяются разность энтальпий ΔH^0 и разность энтропий ΔS^0 при стандартных условиях, соответственно, по уравнениям (3.9) и (3.10). После этого термодинамический потенциал реакции $\Delta G^0_{\text{реакц}}$ рассчитывается по уравнению Гиббса – Гельмгольца.

При известных термодинамических потенциалах соединений, участвующих в реакции (для простых веществ - элементов ΔG^0 равен нулю), можно применить другую методику расчета, при которой $\Delta G^0_{\text{реакц}}$ определяется суммированием значений ΔG^0 отдельных веществ. При решении задачи от суммы термодинамических потенциалов получаемых веществ, т.е. стоящих в правой части химической реакции, отнимается сумма потенциалов исходных веществ. Знаки перед величинами термодинамических потенциалов следует обязательно учитывать.

Например, для реакции $2FeO + Si = 2Fe + SiO_2$ термодинамический потенциал определяют по выражению

$$\Delta G^0_{\text{реакц}} = \Delta G^0_{SiO_2} + 2\Delta G^0_{Fe} - \left(2\Delta G^0_{FeO} + \Delta G^0_{Si} \right), \quad (3.15)$$

но поскольку ΔS^0 для простых веществ равен нулю, то выражение упростится:

$$\Delta G^0_{\text{реакц}} = \Delta G^0_{SiO_2} - 2\Delta G^0_{FeO} \quad (3.16)$$

Количество участвующих в реакции молекул (молей вещества) учитывается. Для упрощения расчетов термодинамический потенциал реакции часто представляют в виде

$$\Delta G^0 = M + NT, \quad (3.17)$$

и коэффициенты M и N для определенных интервалов температур приведены в приложении Б.

На практике очень часто константу равновесия выражают одновременно через концентрации (активности, парциальное давление) веществ и эмпирические формулы. Например, для реакции разложения мрамора (3.4) константа равнове-

сия представляется в виде

$$\lg K_p = \lg \frac{P_{CO_2}}{10^5} = -\frac{9300}{T} + 7,85, \quad (3.18)$$

для реакции диссоциации водяного пара $H_2O = H_2 + 1/2 O_2$ константа может быть записана так:

$$\lg K_p = \lg \frac{P_{H_2} P_{O_2}^{1/2}}{P_{H_2O}} = -\frac{13154}{T} + 3,045. \quad (3.19)$$

Такой вид константы равновесия удобен, например, в тех случаях, когда необходимо определить равновесные концентрации или парциальные давления веществ. Для этого, прежде всего по равенству

$$\lg K_p = -\frac{13154}{T} + 3,045, \quad (3.20)$$

находят величину K_p для заданной температуры, а затем константу равновесия приравнивают отношению парциальных давлений:

$$K_p = \frac{P_{H_2} P_{O_2}^{1/2}}{P_{H_2O}} \quad (3.21)$$

Из уравнения (3.21) можно, например, при известном парциальном давлении водяного пара и суммарном давлении паров в системе определить равновесные парциальные давления водорода и кислорода. В других случаях, при известных парциальных давлениях или концентрациях веществ и выражении (3.21), можно установить направление реакции, так как всякая система стремится к равновесию, и поэтому отношение концентраций должно изменяться в сторону приближения к константе равновесия.

Для установления направления реакции при известных концентрациях реагирующих веществ может служить уравнение изотермы химических реакций Вант-Гоффа:

$$\Delta G_T = -RT \ln K + RT \ln \Pi \quad (3.22)$$

где ΔG_T - термодинамический потенциал реакции при температуре T ;

R - газовая постоянная, $R = 8,31$ Дж/(моль·К);

Π - отношение концентраций веществ, участвующих в реакции.

Форма записи и вычисления числа Π точно такая же, как для константы равновесия K .

В случае достижения системой термодинамического равновесия $\Delta G_T = 0$, если $\Delta G_T < 0$, реакция идет вправо, если $\Delta G_T > 0$, реакция идет влево.

Принципиальная возможность протекания реакции, установленная по уравнению (3.22), не подтверждает, что реакция пойдет с практически ощутимой скоростью. Для определения скорости протекания химической реакции необходимо обращаться к химической кинетике. Для условий сварки это тем более важно, так как время сварочного процесса ограничено.

Понятие термодинамического потенциала способно дать представление не только о направлении химической реакции, но также и о силе химического сродства элементов. При этом чем больше абсолютная величина отрицательного значения термодинамического потенциала реакции соединения веществ, тем больше их химическое сродство. Это можно показать на примере двух химических реакций для температуры 1 500K:



Для реакции (3.23) при стандартных условиях $\Delta G^0_{реакц} = -28\,739$ Дж, для реакции (3.24) $\Delta G^0_{реакц} = -251\,411$ Дж. Следовательно, химическое сродство азота к кремнию больше, чем к хрому.

Термодинамический потенциал вещества зависит не только от температуры, что следует из выражения (3.17), но и от вида химической реакции. Таким образом, химическое сродство одного и того же элемента не является постоянным, а определяется видом получающегося соединения. Для подтверждения высказанного положения обратимся к реакциям образования трех сульфидов при температуре 700K. Исходные данные и результаты расчета термодинамического потенциала образующихся веществ сведены в табл.3.1, из которой следует, что при одной и той же температуре в зависимости от вида образующегося сульфида никель может иметь и большее, и меньшее по сравнению с железом сродство к сере.

Таблица 3.1 – Химические реакции образования сульфидов и соответствующие им термодинамические потенциалы

Реакция	Пределы температуры, K	$\Delta G^0 = M + NT$, Дж	ΔG^0 при 700K, Дж
$Fe + 1/2 S_{2A} = FeS_T$	412.....1 179	$\Delta G^0 = -150\,350 + 52,58 T$	-113 544
$Ni_T + 1/2 S_{2A} = NiS_T$	298....773	$\Delta G^0 = -146\,454 + 72,01 T$	-96 047
$3Ni_T + S_{2A} = Ni_3S_{2T}$	298....1 063	$\Delta G^0 = -331\,762 + 163,33 T$	-217 431

Задачи к разделу 3

3.1 По уравнению Вант-Гоффа рассчитать константу равновесия реакции при стандартных условиях и заданной температуре.

Таблица 3.2

Вариант	Химическая реакция	Вариант	Химическая реакция
1	$C_T + 1/2O_{2\Gamma} = CO_\Gamma$	7	$Mn_T + 1/2S_{2\Gamma} = MnS_T$
2	$CO_\Gamma + 1/2O_{2\Gamma} = CO_{2\Gamma}$	8	$3Fe_T + C_T = Fe_3C_T$
3	$2Cu + 1/2O_{2\Gamma} = Cu_2O_T$	9	$1/2N_{2\Gamma} + 1/2O_{2\Gamma} = NO_\Gamma$
4	$2Cr_T + 3/2O_{2\Gamma} = Cr_2O_{3T}$	10	$Si_T + O_{2\Gamma} = SiO_{2T}$
5	$H_{2\Gamma} + 1/2O_{2\Gamma} = H_2O_\Gamma$	11	$Ti_T + O_{2\Gamma} = TiO_{2T}$
6	$Mn_T + 1/2O_{2\Gamma} = MnO_T$	12	$Fe_T + 1/2S_{2\Gamma} = FeS_T$

Индексы Т и Г обозначают, соответственно, твердое и газообразное состояние вещества.

3.2 Определить влияние температуры на константу равновесия химической реакции $2CO \leftrightarrow C_T + CO_2$. Построить график зависимости K_p от температуры

$$\lg K_p = \lg \frac{P_{CO_2}}{P_{CO}^2} = \frac{8900}{T} = 9,11.$$

Таблица 3.3

Показатели	Вариант											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Температура, К	1800	1850	1900	1950	2000	2050	2100	2150	2200	2250	2300	2350
	1810	1860	1910	1960	2010	2060	2110	2160	2210	2260	2310	2360
	1820	1870	1920	1970	2020	2070	2120	2170	2220	2270	2320	2370
	1830	1880	1930	1980	2030	2080	2130	2180	2230	2280	2330	2380
	1840	1890	1940	1990	2040	2090	2140	2190	2240	2290	2340	2390

3.3 Используя приближение Улиха, рассчитать константу равновесия реакции при заданной температуре.

Таблица 3.4

Вариант	Химическая реакция	Т, К	Вариант	Химическая реакция	Т, К
1	$Fe + 1/2O_2 = FeO$	2 000	7	$CaO + CO_2 = CaCO_3$	2 200
2	$2Fe + 3/2O_2 = Fe_2O_3$	1 800	8	$Ca + 1/2S_2 = CaS$	1 500
3	$2/3Fe_3O_4 + 1/6O_2 = Fe_2O_3$	2 200	9	$Fe + 1/2S = FeS$	1 200
4	$2Cu + 1/2O_2 = Cu_2O$	2 100	10	$2Cu + 1/2S_2 = Cu_2S$	1 400
5	$2Al + 3/2O_2 = Al_2O_3$	1 900	11	$3Fe + C = Fe_3C$	1 400
6	$Mn + 1/2O_2 = MnO$	2 200	12	$Si + C = SiC$	2 100

3.4 Определить температуру, при которой возможно химическое равновесие реакции $FeO + CO \leftrightarrow Fe + CO_2$ при указанных парциальных давлениях газов. Константа равновесия взаимодействия закиси железа и СО при отсутствии растворов имеет вид

$$lqK_p = lq \frac{P_{CO_2}}{P_{CO}^2} = \frac{949}{T} = 1,14.$$

Построить график зависимости парциального давления СО от температуры равновесия

Таблица 3.5

Показатели	Вариант		
	1		2
Парциальное давление газов, Па 10^4	CO	1,40; 1,41; 1,42; 1,43; 1,44	1,45; 1,46; 1,47; 1,48; 1,49
	CO ₂	8,60; 8,59; 8,58; 8,57; 8,56	8,55; 8,54; 8,53; 8,52; 8,51

Продолжение таблицы 3.5

Показатели	Вариант		
	3		4
Парциальное давление газов, Па 10^4	CO	1,50; 1,51; 1,52; 1,53; 1,54	1,55; 1,56; 1,57; 1,58; 1,59
	CO ₂	8,50; 8,49; 8,48; 8,47; 8,46	8,45; 8,44; 8,43; 8,42; 8,41

Продолжение таблицы 3.5

Показатели	Вариант		
	5		6
Парциальное давление газов, Па 10^4	CO	1,60; 1,61; 1,62; 1,63; 1,64	1,65; 1,66; 1,67; 1,68; 1,69
	CO ₂	8,40; 8,39; 8,38; 8,37; 8,36	8,35; 8,34; 8,33; 8,32; 8,31

Продолжение таблицы 3.5

Показатели	Вариант		
	7		8
Парциальное давление газов, Па 10^4	CO	1,70; 1,71; 1,72; 1,73; 1,74	1,75; 1,76; 1,77; 1,78; 1,79
	CO ₂	8,30; 8,29; 8,28; 8,27; 8,26	8,2; 8,24; 8,23; 8,22; 8,21

Продолжение таблицы 3.5

Показатели	Вариант		
	9		10
Парциальное давление газов, Па 10^4	CO	1,80; 1,81; 1,82; 1,83; 1,84	1,85; 1,86; 1,87; 1,88; 1,89
	CO ₂	8,20; 8,19; 8,18; 8,17; 8,16	8,15; 8,14; 8,13; 8,12; 8,11

Продолжение таблицы 3.5

Показатели	Вариант		
	11		12
Парциальное давление газов, Па 10^4	CO	1,90; 1,91; 1,92; 1,93; 1,94	1,95; 1,96; 1,97; 1,98; 1,99
	CO ₂	8,10; 8,09; 8,08; 8,07; 8,06	8,05; 8,04; 8,03; 8,02; 8,01

3.5 Определить равновесное парциальное давление компонентов газовой фазы при взаимодействии закиси железа и CO по реакции $FeO + CO \leftrightarrow Fe + CO_2$. Суммарное давление CO и CO₂ равно 10^5 Па.

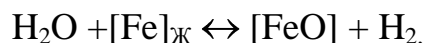
Константа равновесия реакции при отсутствии растворов имеет вид

$$lqK_p = lq \frac{P_{CO_2}}{P_{CO}} = \frac{949}{T} = 1,14.$$

Таблица 3.6

Показатели	Вариант											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Температура	1800	1850	1900	1950	2000	2050	2100	2150	2200	2250	2300	2350

3.6 Определить характер (восстановительный или окислительный) газовой фазы, состоящей из H₂O и H₂, по отношению к FeO в железе при заданной температуре:



$$lqK_p = lq \frac{P_{H_2O}}{P_{H_2} [FeO]} = \frac{10200}{T} + 5,5.$$

Таблица 3.7

Показатели		Вариант									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Парциальное давление газов, Па·10 ⁵	H ₂ O	0,20	0,30	0,27	0,22	0,30	0,36	0,45	0,48	0,17	0,15
		0,80	0,70	0,73	0,78	0,70	0,65	0,55	0,52	0,83	0,85
[FeO], масс. %		0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,2	0,2
Температура T, К		1873	1873	1873	1873	1950	1950	1950	1950	2000	2000

Продолжение таблицы 3.7

Показатели		Вариант	
		11	12
Парциальное давление газов, Па·10 ⁵	H ₂ O	0,20	0,22
	H ₂	0,80	0,78
[FeO], масс. %		0,20	0,20
Температура T, К		2000	2000

3.7 Определить характер (восстановительный или окислительный) газовой фазы, состоящей из CO₂ и CO, по отношению к FeO в железе при заданной температуре:



$$\lg K_p = \lg \frac{P_{\text{CO}_2}}{P_{\text{CO}}[\text{FeO}]} = \frac{11576}{T} - 6,855.$$

Таблица 3.8

Показатели		Вариант							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Парциальное давление газов, Па·10 ⁵	CO ₂	0,050	0,055	0,065	0,030	0,045	0,050	0,028	0,030
	CO	0,950	0,945	0,935	0,970	0,955	0,950	0,972	0,970
[FeO], масс. %		0,30				0,35			0,40
Температура T, К		1873				1950			2000

Продолжение таблицы 3.8

Показатели		Вариант			
		9	10	11	12
Парциальное давление газов, Па·10 ⁵	CO ₂	0,035	0,010	0,012	0,014
	CO	0,965	0,990	0,988	0,986
[FeO], масс. %		0,40	0,20		
Температура T, К		2000	2050		

3.8 Определить влияние температуры на направление химической реакции $CO_2 + [Fe]_{ж} \leftrightarrow [FeO] + CO$ при заданных концентрациях веществ:

$$lqK_p = lq \frac{P_{co_2}}{P_{co}[FeO]} = \frac{11576}{T} - 6,855.$$

Таблица 3.9

Показатели		Вариант							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Парциальное давление газов, Па·10 ⁵	CO ₂	0,057	0,050	0,050	0,045	0,041	0,038	0,035	0,0325
	CO	0,943	0,950	0,950	0,955	0,959	0,962	0,965	0,9675
[FeO], масс. %		0,20	0,21	0,25	0,27	0,30	0,33	0,35	0,40
Температура T, К		1815	1840	1865	1890	1915	1940	1965	1990
		1820	1845	1870	1895	1920	1945	1970	1995
		1825	1850	1875	1900	1925	1950	1975	2000
		1930	1855	1880	1905	1930	1955	1980	2005
		1935	1860	1885	1910	1935	1960	1985	2010

Продолжение таблицы 3.9

Показатели		Вариант			
		9	10	11	12
Парциальное давление газов, Па·10 ⁵	CO ₂	0,032	0,030	0,028	0,027
	CO	0,968	0,970	0,972	0,973
[FeO], масс. %		0,40	0,50	0,55	0,60
Температура T, К		2015	2040	2065	2090
		2020	2045	2070	2095
		2025	2050	2075	2100
		2030	2055	2080	2105
		2035	2060	2085	2110

3.9 Определить температуру, при которой упругость диссоциации CaCO₃ равна указанному для каждого варианта значению. Мрамор разлагается по схеме

$\text{CaCO}_3 \leftrightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$. Расчет проводить по уравнению (3.10), в котором упругость диссоциации выражается в паскалях (Па).

Таблица 3.10

Показатели	Вариант						
	1	2	3	4	5	6	7
P_{CO_2} , Па	10^2	$3 \cdot 10^2$	$5 \cdot 10^2$	$7,5 \cdot 10^2$	10^3	$2 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^3$

Продолжение таблицы 3.10

Показатели	Вариант				
	8	9	10	11	12
P_{CO_2} , Па	$5 \cdot 10^3$	$7,5 \cdot 10^3$	10^4	$5 \cdot 10^4$	10^5

3.10 Определить упругость диссоциации оксидов при различных температурах. Построить график зависимости упругости диссоциации от температуры.

Таблица 3.11

Вариант	Температура Т, К	Реакция диссоциации	Уравнение для определения упругости диссоциации оксида, Па
1	1000, 1200, 1400, 1600, 1800	$2\text{Fe}_3\text{O}_4 \leftrightarrow 6\text{FeO} + \text{O}_2$	$\lg P_{\text{O}_2} = -\frac{32056}{T} + \lg T + 14,55$
2	1600, 1700, 1800, 1900, 2000		
3	1600, 1700, 1800, 1900, 2000	$2\text{FeO} \leftrightarrow 2\text{Fe} + \text{O}_2$	$\lg P_{\text{O}_2} = -\frac{26868}{T} + \lg T + 8,40$
4	1750, 1800, 1850, 1900, 1950		
5	1725, 1800, 1875, 1950, 2025	$2\text{NiO} \leftrightarrow 2\text{Ni} + \text{O}_2$	$\lg P_{\text{O}_2} = -\frac{27400}{T} + 16,35$
6	1750, 1800, 1850, 1900, 1950		
7	1150, 1200, 1250, 1300, 1350	$2\text{Cu}_2\text{O}_{\text{TB}} \leftrightarrow 4\text{Cu}_{\text{TB}} + \text{O}_2$	$\lg P_{\text{O}_2} = -\frac{17400}{T} + 11,6$
8	950, 1050, 1150, 1250, 1350		
9	1360, 1390, 1420, 1450, 1480	$2\text{Cu}_2\text{O}_{\text{TB}} \leftrightarrow 4\text{Cu}_{\text{Ж}} + \text{O}_2$	$\lg P_{\text{O}_2} = -\frac{20140}{T} + 13,6$
10	1375, 1400, 1425, 1450, 1475		
11	1510, 1530, 1560, 1570, 1590	$2\text{Cu}_2\text{O}_{\text{Ж}} \leftrightarrow 4\text{Cu}_{\text{Ж}} + \text{O}_2$	$\lg P_{\text{O}_2} = -\frac{14250}{T} + 9,7$
12	1550, 1600, 1650, 1700, 1750		

4 МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

При сварке плавлением наблюдается взаимодействие расплавленного металла с газовой и шлаковой фазами. Несмотря на то, что процессы взаимодействия с обеими фазами идут одновременно, часто в отдельности рассматривают взаимодействие металла с газовой фазой и металла со шлаковой фазой. Такое допущение вносит погрешности в расчеты и приводит к тому, что полученные результаты могут дать лишь качественную картину, но в первом приближении этого достаточно, поэтому в дальнейшем применен такой подход.

Газовая фаза при сварке плавлением может состоять: из газов воздуха; газов, образующихся при плавлении и испарении покрытий электродов и флюсов; газов, получающихся в результате протекания химических реакций в сварочной ванне; газов из адсорбированной влаги и загрязнений на металле; паров металлов. Газовая фаза сильно влияет на химический состав металла шва и его свойства, поэтому знание ее состава крайне необходимо для анализа металлургических сварочных процессов.

Несмотря на принимаемые защитные меры (сварка покрытыми электродами, под флюсом, в защитных газах и пр.), полностью исключить попадание воздуха в зону сварки невозможно. При сварке в инертных газах возможен подсос воздуха вследствие турбулентности. Кроме того, приходится считаться с наличием примесей в защитных газах. Поэтому при сварке химически активных металлов, например титана, рекомендуется дополнительная очистка аргона. Воздух способен также проникать через слой флюса и шлака. Особенно это проявляется при электрошлаковой сварке, которая характеризуется длительным временем существования ванны расплавленного металла. О степени защиты металла шва от воздуха можно судить по концентрации азота. В табл. 4.1, по данным А.А.Ерохина, показано содержание азота в металле шва при разных способах сварки. На основании этого считают, что при сварке покрытыми электродами в газовой фазе дуги содержится до 3% воздуха. При сварке под флюсом и электрошлаковой сварке это содержание должно быть еще меньше.

Таблица 4.1 - Содержание азота в наплавленном металле при различных способах сварки

Способ сварки	Содержание азота, %
Основной металл и проволока (низкоуглеродистая сталь)	0,002.....0,003
Голой проволокой без защиты	0,1...0,2
Электродами УОНИ-13/55, Ø2,5 мм	0,062
Порошковой проволокой ЭПС-15/2 короткой дугой ($U_d=23...26$ В)	0,004...0,010

Кроме кислорода и азота, воздух может вносить водород в газовую фазу в тех случаях, когда в нем содержится влага. Гигроскопическая и кристаллизацион-

ная вода, как правило, содержатся в электродных материалах. От этой влаги необходимо избавляться прокалкой электродов и флюсов. На состав газовой фазы влияют поверхностные загрязнения - оксиды, ржавчина, жировые и пылевые включения. Ржавчина представляет собой гидрат оксида железа, разлагающийся при повышении температуры с выделением паров воды. Жировые загрязнения служат органическими соединениями, дающими при нагреве водородсодержащие газы.

Гораздо большее количество газов образуется при диссоциации веществ, входящих в покрытия и флюсы. Экспериментальное исследование охлажденной газовой фазы, т.е. без учета паров металлов, показало, что она состоит в основном из CO_2 , CO , H_2 , H_2O . По данным И.К.Походни, при сварке электродами АНО-1 соотношение этих газов примерно следующее: $H_2 \sim 55\%$, $CO \sim 36\%$, $CO_2 \sim 5\%$, $H_2O \sim 4\%$. Со снижением влажности покрытия уменьшается количество паров воды и водорода.

Количество газов, получающихся при диссоциации компонентов электродных покрытий, может быть определено по методике Г.Л.Петрова. Предположим, что относительная масса покрытия $G_{покр}/G_{пров}$ составляет 0,4; доля компонента A , дающего при диссоциации газ, по массе в покрытии равна 25%. Тогда на 1 г расплавленного электродного металла приходится 0,4 г покрытия, а в пересчете на вещество A , z ,

$$0,4 \cdot \frac{25}{100} = 0,1. \quad (4.1)$$

Пусть компонент A диссоциирует по формуле



где D - газ.

Для того чтобы определить массу газа D , необходимо знать молекулярную массу всех веществ, входящих в формулу (4.2).

Принимаем: a - молекулярная масса вещества A ;
 b - молекулярная масса вещества B ;
 d - молекулярная масса вещества D .

Тогда на 1 г металла образуется газа D , г:

$$0,1 \frac{d}{a+b+d}. \quad (4.3)$$

Если определять объем газа D , образующегося при плавлении 1 г электродной проволоки и 0,4 г покрытия, необходимо учесть, что объем грамм-молекулы любого газа равен $22\,400 \text{ см}^3$. Тогда

$$V_{GA(273)} = 22400 \frac{0,1d / (a+b+d)}{d} = 22400 \frac{0,1}{a+b+d} \quad (4.4)$$

Вычисленная величина объема газа - условная, так как соответствует температуре 273 К. С повышением температуры объем газа увеличивается и опреде-

ляется по формуле

$$V_T = V_{(273)} [1 + \alpha (T - 273)] \quad (4.5)$$

где α - коэффициент объемного расширения газа, $\alpha = 0,00366 \text{ K}^{-1}$;

T - температура газа, К.

По формуле (4.5) может быть определен объем газа при любой температуре. Рассмотренная методика позволяет определять объем газов, получающихся при диссоциации любых веществ электродных покрытий, а в принципе, и сварочных флюсов.

Обязательной составляющей газовой фазы при сварке плавлением являются пары металлов. Под паром принято понимать газообразное вещество, которое при комнатной температуре и атмосферном давлении находится в твердом или в жидком состоянии. Пар образуется в результате процессов испарения или сублимации. Испарением называется переход частиц вещества с поверхности жидкой фазы в газовую фазу. Если же частицы вещества уходят в газовую фазу с поверхности твердого тела, то такой процесс называется *сублимацией*. Обратный процесс, при котором частицы вещества из газовой фазы переходят на поверхность твердых или жидких тел, называется *конденсацией*. Таким образом, конденсатами могут быть как твердые, так и жидкие тела. При повышении температуры количество пара над конденсатом увеличивается и при достижении термодинамического равновесия системы «пар – конденсат» пар называется насыщенным. Такое равновесное состояние характеризуется давлением, или упругостью насыщенного пара $P_{\text{нас}}$.

Образование паров над жидкостью может происходить в результате кипения, которое характеризуется образованием пузырьков пара внутри жидкого металла и выходом их на поверхность. Кипение вещества происходит при определенных температурах, зависящих от давления. Пузырек пара в жидком металле может существовать только при условии, что давление пара в пузырьке будет превышать внешнее давление системы:

$$P_{\text{вн.д}} = P_{\text{г.ф}} + h_1 \rho_1 + h_2 \rho_2 + \frac{2\sigma}{r}, \quad (4.6)$$

где $P_{\text{г.ф}}$ - давление газовой фазы над жидким металлом;

h_1, h_2 - высота, соответственно, столба металла над пузырьком и слоя шлака над пузырьком;

ρ_1, ρ_2 - плотность, соответственно, металла и шлака;

σ - поверхностное натяжение на границе раздела «газ-металл»;

r - радиус пузырька пара (газа).

Поскольку второе и третье слагаемые (металлостатическое и шлакостатическое давления) малы и составляют лишь тысячные доли атмосферного давления, ими принято пренебрегать. Последнее слагаемое в основном определяется радиусом пузырька и при малых значениях r пренебрегать величиной $2\sigma/r$ не следует.

В случае большого пузырька можно считать, что $P_{вн.д} \sim P_{г.ф}$. В этом случае условием кипения является выражение

$$P_{нас} \geq P_{г.ф}. \quad (4.7)$$

Следует отметить, что приведенные рассуждения и формула (4.6) справедливы не только для пузырьков пара, но и для газов, образующихся в жидком металле в результате протекания химических реакций. Поэтому формула (4.6) применяется для анализа процессов парообразования при сварке.

Ранее было указано, что в газовой фазе при дуговой сварке кроме паров металлов присутствуют CO_2 , CO , H_2 , H_2O . При высоких температурах сварочного процесса ($5000...7000K$ – при дуговой сварке, $8000...12000K$ – при плазменной сварке) молекулы газов диссоциируют на более простые молекулы и атомы. Диссоциация двухатомных газов в сварочных условиях очень важна, так как благодаря ей повышается химическая активность газов, и они легко взаимодействуют с расплавленным металлом. Процесс диссоциации газовых молекул определяется силами атомарной связи и температурой нагрева, т.е. значением энергии возбуждения. Диссоциация сопровождается поглощением теплоты, таким образом, эти реакции являются *эндотермическими*. Диссоциация сложных газов в условиях сварки описывается соотношениями:



Продуктами этих реакций являются простые молекулярные газы O_2 и H_2 , а также двухатомный газ - оксид углерода CO . Продукты реакций (4.8) и (4.9) при дальнейшем повышении температуры также диссоциируют. Таким образом, диссоциация CO_2 , и H_2O - это многостадийный процесс. В какой-то степени реакции первой и второй стадии идут одновременно, поэтому они могут быть названы параллельными. В условиях сварки важны процессы диссоциации простых молекулярных газов, кДж/моль:

$$H_2 = 2H - 434,5; \quad (4.10)$$

$$N_2 = 2N - 712,0; \quad (4.11)$$

$$O_2 = 2O - 495,3. \quad (4.11')$$

Видно, что для диссоциации азота необходимо затратить самое большое количество энергии. Это говорит о том, что силы атомарной связи в молекуле азота больше, чем в молекулах водорода и кислорода. При одинаковых условиях азот будет диссоциирован в наименьшей степени.

Константы равновесия реакций диссоциации записываются обычным путем. Для диссоциации водяного пара (4.9) выражение для K_p имеет вид

$$K_p = \frac{P_{H_2} P_{O_2}^{1/2}}{P_{H_2O}}; \quad (4.12)$$

для диссоциации водорода (4.10)

$$K_p = \frac{P_H^2}{P_{H_2}}. \quad (4.13)$$

Для расчета константы равновесия могут быть использованы эмпирические формулы, которые получены для большинства реакций диссоциации. Приближенное уравнение Чепмена и Самарина описывает K_p для реакции (4.9):

$$\lg K_{P_{H_2O}} = -\frac{13154}{T} + 3,045, \quad (4.14)$$

приближенное уравнение Нернста предназначено для определения константы равновесия реакции (4.10):

$$\lg K_{P_{H_2O}} = -\frac{22570}{T} + 1,504 \lg T + 0,767. \quad (4.15)$$

При сварке в углекислом газе важен процесс диссоциации, описываемый реакцией (4.8). Константу равновесия рассчитывают по формуле

$$\lg K_{P_{H_2O}} = -\frac{29500}{T} + 9,07. \quad (4.16)$$

Расчеты по этому уравнению представляют теоретический интерес, так как показывают зависимость константы равновесия реакции диссоциации CO_2 от температуры. К сожалению, температурный режим дуги по существу неуправляем, поэтому воздействовать на протекание диссоциации углекислого газа практически не представляется возможным. В то же время протекание реакции (4.8) определяет окислительный характер газовой среды. Поэтому даже приблизительное знание температуры газов полезно, поскольку поможет составить представление о процессах диссоциации с помощью формулы (4.16).

Метод использования интерполяционных формул для расчета логарифмов констант равновесия реакций диссоциации газов дает более точные результаты и имеет вид

$$\lg K_p = \hat{e}_0 + \hat{e} \ln x + \hat{e}_{-2} x^{-2} + \hat{e}_{-1} x^{-1} + \hat{e}_1 x + \hat{e}_2 x^2 + \hat{e}_3 x^3 + \hat{e}_4 x^4 + \hat{e}_5 x^5 + \hat{e}_6 x^6 + \hat{e}_7 x^7, \quad (4.17)$$

где $\hat{e}_0, \hat{e}, \hat{e}_{-2}, \hat{e}_{-1}, \hat{e}_1, \hat{e}_2, \dots$ - коэффициенты, приведенные в приложении В.

$$x = T \cdot 10^{-4}; \quad 293,15 \leq T \leq 6000 K. \quad (4.18)$$

Использование интерполяционных формул удобно в связи с наличием справочного материала для большого количества газов.

Важной характеристикой процесса диссоциации газов служит степень диссоциации α , под которой понимается отношение числа диссоциированных молекул к их первоначальному числу. Таким образом, α не может быть больше 1. Для определения степени диссоциации используют формулу

$$\alpha = \sqrt{K_p / \left(K_p + 4 \frac{P}{10^5} \right)}, \quad (4.19)$$

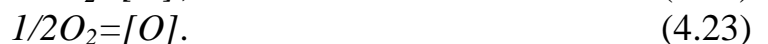
где K_p - константа равновесия;
 p - давление, Па.

Понятие степени диссоциации дает представление о составах газовой фазы при различных температурах, что необходимо для анализа процессов взаимодействия газов с металлом сварочной ванны.

Для сварочных процессов практический интерес представляет случай, когда расплавленный металл контактирует с газовой фазой, имеющей в своем составе влагу (пары воды), например при сварке в аргоне, который может содержать некоторое количество влаги. Водяной пар в условиях сварки будет разлагаться, а образующиеся кислород и водород растворяются в металле:



Указанная реакция - итоговая и включает в себя отдельные реакции:

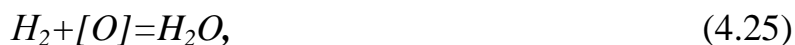


Константа равновесия реакции (4.22) зависит от температуры и определяется уравнением

$$\lg K_H = \lg \frac{a_{[H]}}{P_{H_2}^{1/2}} = -\frac{1900}{T} - 1,577 \quad (4.24)$$

Поскольку растворимость водорода достаточно мала (влаги в аргоне содержится мало), то для чистого железа можно принять $a_{[H]} = [\%H]$. Жидкое железо сварочной ванны имеет большое сродство к кислороду, поэтому в результате взаимодействия в газовой фазе кислорода остается мало. Растворимость водорода при этом зависит от концентрации кислорода в стали.

Равновесие в рассматриваемой системе определяется реакцией



константа равновесия которой имеет вид

$$\lg K_a = \lg \frac{P_{H_2O}}{P_{H_2} \cdot a_{[O]}} = -\frac{6728}{T} - 2,976. \quad (4.26)$$

Растворимость водорода

$$[H] = K_H \sqrt{\frac{P_{H_2O}^U}{1 + K_a \cdot a_{[O]}}}, \quad (4.27)$$

где $P_{H_2O}^U$ - парциальное давление водяного пара в исходной газовой смеси;

$a_{[O]}$ - активность кислорода в металле, которую с небольшой погрешностью можно принять равной его концентрации.

Таким образом, для расчета растворимости водорода по формуле (4.27) необходимо знать величину $P_{H_2O}^U$. Определение парциального давления водяного пара основано на известном содержании H_2O в аргоне (г/м³). Прежде всего, определяется объем водяного пара в газовой фазе, состоящей в основном из аргона. Предположим, что в 1 м³ газа содержится 0,1 г влаги, тогда объем влаги

$$V_{H_2O} = \frac{0,1}{M} 0,0224 \text{ м}^3, \quad (4.28)$$

где M - молекулярная масса влаги;
0,0224 - объем грамм-молекулы газа.

Для расчета парциального давления водяного пара $P_{H_2O}^U$ можно принять давление газовой фазы объемом 1 м³ равным 10⁵ Па. Тогда $P_{H_2O}^U$ пропорционально объему влаги в общем объеме газовой фазы. Например, $V_{H_2O} = 0,002 \text{ м}^3$, следовательно,

$$P_{H_2O}^U = \frac{10^5 \cdot 0,002}{1} = 200 \text{ Па}. \quad (4.29)$$

Поскольку газы в сварных швах приводят к ухудшению их свойств и работоспособности, концентрация газов должна быть минимальной. Применительно к кислороду это обеспечивается раскислением металла. Раскисление может осуществляться удалением кислорода с помощью углерода и металлов, имеющих большее сродство к кислороду (*Mn, Si, Ti, Al* и др.). Такой вид раскисления называется осаждающим. В общем виде реакция может быть представлена так:

$$[Me_xO_y] + z[Ra] = x[Me] + (Ra_zO_y), \quad (4.30)$$

где $[Me_xO_y]$ - концентрация оксида;

Ra - раскислитель.

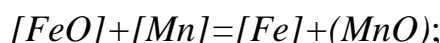
При осаждающем раскислении продукты реакции (4.30) могут получаться как в конденсированном (твердом или жидком), так и в газообразном состоянии. Раскисляемый металл должен находиться в жидком состоянии. Металлы - раскислители вводят в сварочную ванну через электродный металл, покрытие электродов, флюс, сердечник порошковой проволоки или ленты. Углерод через сварочные материалы специально не вводят, а раскисление получается за счет элемента, содержащегося в свариваемом и электродном металлах. При этом углерод выступает как раскислитель лишь при высоких температурах – в каплях металла, в электродном пятне сварочной ванны, – но и этот процесс является нежелательным, поскольку он уменьшает концентрацию основного легирующего элемента – углерода и, кроме того, дает газообразную окись углерода, приводящую к образованию пор.

Реакция

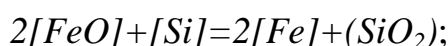


должна подавляться введением других раскислителей.

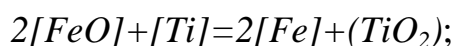
Процесс раскисления стали более активными металлами - раскислителями в металлургии хорошо изучен и представляется следующим выражениями:



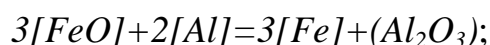
$$\lg K_{Mn} = \lg \left[\frac{[O]}{[Mn]} \right] = -25270/T + 12,55; \quad (4.32)$$



$$\lg K_{Si} = \lg \left[\frac{[O]^2}{[Si]} \right] = -48174/T + 21,63; \quad (4.33)$$



$$\lg K_{Ti} = \lg \left[\frac{[O]^2}{[Ti]} \right] = -30700/T + 10,33; \quad (4.34)$$



$$\lg K_{Al} = \lg \left[\frac{[O]^3}{[Al]^2} \right] = -58715/T + 16,5. \quad (4.35)$$

Марганец среди рассматриваемых раскислителей - самый слабый, поэтому

в процессе раскисления создаются большие остаточные концентрации Mn ; но этот элемент, кроме всего прочего, оказывает десульфуризирующее воздействие на металл и тем самым уменьшает опасность образования горячих трещин при сварке.

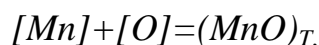
Кремний является более активным раскислителем, чем марганец. Тем не менее, введение кремния в сварочную ванну приходится ограничивать, так как оксиды кремния увеличивают кислотность шлака и делают его вязким.

Титан - еще более сильный окислитель, чем марганец и кремний. Образующийся кислотный оксид TiO_2 нерастворим в металле и легко вступает в комплексы, переходящие в шлак. Кроме того, титан полезен как сильный модификатор, т.е. элемент, способствующий измельчению зерна металла.

Алюминий - наиболее сильный раскислитель среди рассматриваемых металлов, поэтому остаточные (равновесные) содержания Al в металле минимальны. Недостаток алюминия как раскислителя - его способность давать в шве мельчайшие неметаллические включения.

Уравнения (4.32)...(4.35) справедливы для случая раскисления железа одним элементом, но следует помнить, что при комплексном раскислении раскислительная способность Mn , Si , Ti , Al возрастает.

Несколько большая точность расчетов при раскислении одним элементом может быть получена при пользовании уравнениями для определения константы равновесия, учитывающими коэффициенты активности элементов. Примером могут служить реакции раскисления железа марганцем и кремнием с образованием твердых оксидов:



$$\lg K_{Mn} = \lg \frac{[\%O][\%Mn]}{a_{(MnO)}} f_{O}^{Mn} f_{Mn}^{Mn} = -\frac{15065}{T} + 6,25, \quad (4.36)$$

где f_{O}^{Mn} , f_{Mn}^{Mn} - коэффициенты активности, соответственно, кислорода и марганца:

$$\lg f_{O}^{Mn} = e_{O}^{Mn} [\%Mn], \quad (4.37)$$

$$\lg f_{Mn}^{Mn} = e_{Mn}^{Mn} [\%Mn], \quad (4.38)$$

(параметры взаимодействия e_i^j приведены в приложении Г);

$a_{(MnO)}$ - активность оксида марганца (табл. 4.2).

Таблица 4.2 - Активности оксида марганца MnO в расплавленных сварочных флюсах

Марка флюса	Состав флюсов в мольных долях							$a_{(MnO)}$
	SiO_2	MnO	CaO	MgO	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaF_2	
АН-348А	0,448	0,317	0,068	0,102	0,014	0,001	0,05	0,0215
АН-60	0,482	0,365	0,089	0,01	0,013	0,003	0,037	0,2016
АН-8	0,381	0,245	0,094	0,075	0,057	0,002	0,116	0,0087
АН-26	0,299	0,031	0,083	0,250	0,137	0,001	0,20	0,0058

Активность чистых оксидов равна единице:

$$[Si] + 2[O] = (SiO_2)_T,$$

$$\lg K_{Si} = \lg \frac{[O]^2}{[Si]} = -\frac{30720}{T} + 11,76. \quad (4.39)$$

Коэффициенты активности уравнения (4.39) находятся по зависимостям вида (4.37)

Было отмечено, что углерод, всегда присутствующий в сварных швах, также является раскислителем. В результате взаимодействия углерода с кислородом образуется газ - оксид углерода, который при неблагоприятных условиях может вызвать пористость металла шва:

$$[C] + [O] = CO. \quad (4.40)$$

Константа равновесия реакции образования CO

$$\lg K_C = \lg \frac{[O]}{P_{CO}/10^5} = -\frac{1160}{T} - 2,0, \quad (4.41)$$

т.е. определяется, в частности, парциальным давлением оксида углерода. Множитель $1/10^5$ введен для того, чтобы парциальное давление было выражено в паскалях.

Диффузионное раскисление характеризуется тем, что оксид, находящийся в металле, переходит в шлак. Происходит перераспределение оксида между металлом и шлаком, которое подчиняется закону распределения

$$L = \frac{(FeO)}{[FeO]}, \quad (4.42)$$

где L - константа распределения;
 (FeO) - содержание оксида в шлаке;
 $[FeO]$ - содержание оксида в металле.

Поскольку L при определенной температуре – постоянная величина, процесс раскисления теоретически будет продолжаться до достижения константы распределения. На практике значение константы не достигается, особенно в сварочных условиях, ввиду недостаточности времени.

Для сварочных шлаков константа распределения закисы железа должна быть больше единицы, т.е. шлак должен растворять FeO лучше, чем металл. Константа распределения зависит от состава шлака, поэтому в литературе приводятся различные формулы для определения L . К сожалению, все эти формулы относятся к условиям выплавки стали, но не сварки. Поэтому использование таких формул для расчета сварочных процессов вряд ли оправдано, поскольку они способны дать представление лишь о качественной стороне явления. Примером может служить формула, предложенная в металлургии для случая использования железистых шлаков. Формула откорректирована: для приведения ее к виду (4.42) введен коэффициент 4,5, учитывающий содержание кислорода в оксиде, и температуры переведены по шкале Кельвина:

$$L = \frac{[FeO]}{[Fe]} = \frac{1}{4,5 \cdot 10^{-4} \cdot \left(\frac{T}{273} - 0,0793 \right)} \quad (4.43)$$

Из закона распределения следует, что при повышенных концентрациях в шлаке FeO может происходить окисление металла.

Иногда константа распределения имеет вид, отличный от формулы (4.42). Например, для случая распределения марганца между шлаком и металлом

$$L = \frac{(MnO)}{[Mn]} \quad (4.44)$$

Наряду с газами отрицательное влияние на свойства сварных швов оказывают вредные примеси – сера и фосфор. Сера всегда присутствует в свариваемых и электродных металлах и способствует возникновению кристаллизационных трещин. Происходит это вследствие образования сульфидов и эвтектик с низкими температурами плавления. Например, с железом сера образует сульфид FeS с $T_{пл} = 1468K$ и эвтектику $FeS + Fe$ ($T_{пл} = 1258K$). Еще более низкоплавкая эвтектика получается в хромоникелевых сталях. Эвтектика типа $Ni_3S_2 + Ni$ имеет температуру плавления $917K$. Сульфиды и сульфидные эвтектики при температурах кристаллизации железа находятся в жидком состоянии, оттесняются к границам зерен и способствуют возникновению разрывов (трещин) с ростом сварочных напряжений. Таким образом, для ликвидации вредного воздействия серы в сварные швы необходимо вводить элементы, имеющие, во-первых, большее сродство к сере, чем железо, и, во-вторых, образующие сульфиды с более высокой температурой плавления. Практически в качестве десульфураторов выступают марганец и кальций. Температура плавления MnS $1883K$, CaS – $2273K$. Благоприятное влияние марганца сказывается не только в образовании тугоплавкого сульфида и переводе его в шлак, но также и в том, что оставшийся в металле MnS равномерно

распределяется по всему объему, т.е. марганец понижает ликвацию серы. Практика показала, что для устранения вредного влияния серы необходимо выдерживать следующее соотношение концентраций:

$$\frac{[Mn]}{[S]} = 20 \dots 25.$$

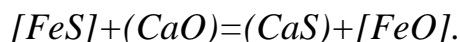
Связывание серы марганцем происходит по реакции



которая заметно проходит в желаемом направлении при пониженных температурах, когда скорости процессов замедляются. Поэтому реакция (4.44) дополняется другой:



Анализируя реакции (4.44') и (4.45), можно отметить, что их интенсификации способствует увеличение концентрации марганца в металле и MnO во флюсе, а также лучшая раскисленность сварочной ванны. При связывании серы кальцием получается сульфид, почти нерастворимый в металле:



Этот процесс интенсивнее развивается вправо с повышением температуры.

В свариваемых черных металлах содержание серы различно. Легированная конструкционная сталь (ГОСТ 4543-71) содержит серы не более 0,035%. В стали углеродистой обыкновенного качества (ГОСТ 380-71) содержание серы допускается до 0,05%. В чугунах содержание серы еще больше.

Равновесие марганца и серы применительно к чугунам для температур выше 1683K выражается уравнением

$$\lg \frac{[Mn]}{[S]} = -\frac{8980}{T} + 4,16, \quad (4.46)$$

которое взято из книги И.С.Куликова и откорректировано с целью использования температур по шкале Кальвина.

Таким образом, марганец – это элемент, способный раскислять и рафинировать металл, а также полезный легирующий элемент, сильно упрочняющий металл. Марганец попадает в шов из основного и электродного металлов и марганцовистых флюсов. Распределение марганца между шлаком и металлом определяется по следующим уравнениям:

для кислых флюсов

$$\lg K_{Mn} = \lg \frac{[\%Mn] \cdot [\%FeO]}{[\%MnO]} = -\frac{5550}{T} + 1,865; \quad (4.47)$$

для основных флюсов

$$\lg K_{Mn} = \lg \frac{[\%Mn] \cdot [\%FeO]}{[\%MnO]} = -\frac{5550}{T} + 2,338, \quad (4.48)$$

где $[\%MnO]$ - содержание оксида марганца во флюсе;

$[\%FeO]$ - содержание закиси железа в шлаке.

Содержание марганца в металле может быть найдено из выражения константы равновесия по формуле

$$[\%Mn] = K_{Mn} \frac{[\%MnO]}{[\%FeO]}, \quad (4.49)$$

из которой видно, что марганца в металле будет тем больше, чем больше MnO во флюсе.

Б.А.Кох предлагает при расчете легирования металла шлаком использовать уравнение вида

$$[\%R_{исх} + \% \Delta R] = K \frac{a_{[FeO]}}{[\%O]}, \quad (4.50)$$

где $\%R_{исх}$ - концентрация элемента R в металле до начала процесса;

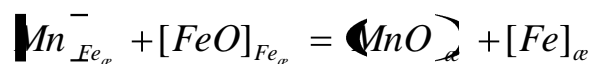
$\% \Delta R$ - приращения концентрации элемента R в результате взаимодействия металла со шлаком;

K - константа равновесия реакции;

$a_{[FeO]}$ - активность оксида, находящегося в шлаке - расплавленном флюсе;

$\% O$ - концентрация кислорода, растворенного в сплаве.

Применительно к реакции раскисления железа марганцем



уравнение (4.50) перепишем следующим образом:

$$[\%Mn_{исх} + \% \Delta Mn] = K_{Mn} \frac{a_{[MnO]}}{[\%O]}, \quad (4.51)$$

где

$$\lg K_{Mn} = -12800/T + 5,78. \quad (4.52)$$

В сварочной практике процессы легирования рассчитывают с помощью коэффициентов перехода. Коэффициентом перехода η' называется отношение концентрации элемента в шве к его исходной концентрации. Принято различать коэффициенты перехода элемента из основного металла и электрода, так как эти компоненты сварочного процесса подвергаются, в частности, различным тепловым воздействиям. Значение коэффициента перехода зависит от условий сварки: способа, режима, концентрации элемента, марки флюса или покрытия и пр. Поэтому коэффициенты перехода следует использовать лишь для тех условий, в которых они определялись. Погрешность расчетов с использованием коэффициентов перехода может достигать до 20%. Уравнение для вычисления степени легирования шва элементом R имеет вид

$$[\% R]_{\text{шва}} = [\% R]_{\text{О.М}} \gamma \eta' + [\% R]_{\text{Э}} (1 - \gamma) \eta'', \quad (4.53)$$

где η' , η'' - коэффициент перехода элемента, соответственно, из основного металла в шов и электродного металла в шов. Как правило, $\eta' > \eta''$.

Расчеты по формуле (4.56) отличаются простотой и доступностью, так как в литературе приводятся сведения о коэффициентах перехода.

Частным случаем расчета химического состава по формуле (4.53) может считаться определение концентрации какого-либо элемента при многослойной наплавке. Чем больше слоев накладывается на основной металл, тем меньшее влияние на химический состав оказывает подложка.

Концентрацию химического элемента в любом слое наплавки определяют по формуле Хасуи и Моригаки:

$$C_w = C_f + \left(\frac{P}{100} \right)^n (C_p - C_f), \quad (4.54)$$

которая, по существу, основана на правиле смешения:

$$[\% R]_{\text{шва}} = [\% R]_{\text{О.М}} \gamma + [\% R]_{\text{Э}} (1 - \gamma), \quad (5.55)$$

так как не учитывает взаимодействия металла с газовой и шлаковой фазами. Поэтому в (4.54) предлагается ввести коэффициенты перехода элементов из основного и электродного металлов. При использовании принятых в отечественной литературе обозначений формула Хасуи и Моригаки примет вид

$$[\% R]_{\text{шва}} = [\% R]_{\text{Э}} \eta'' + \gamma^n [\% R]_{\text{О.М}} \eta' - [\% R]_{\text{Э}} \eta'', \quad (4.56)$$

где $[\% R]_{\text{шва}}$ - концентрация элемента в n -м слое;

n - показатель степени, определяющий число наплавленных слоев.

Взаимодействие металла и шлака зависит от содержания оксидов в последнем. При этом очень важен характер оксидов: кислый, основной или амфотерный. В связи с этим введено понятие основности шлака B , которая формально, исходя из молекулярной теории, может быть представлена в виде

$$B = \frac{\sum R_2O + RO}{\sum RO_2}, \quad (4.57)$$

где $\sum R_2O + RO$, $\sum RO_2$ - сумма оксидов в шлаке, соответственно, основных и кислых, мол. %

Шлаки считаются кислыми при $B < 1$, основными - при $B > 1$, нейтральными - при $B = 1$. Формальным выражение (4.57) является потому, что при взаимодействии металла и шлака важно не просто соотношение концентраций различных оксидов, а наличие свободных оксидов. При этом следует учитывать возможность образования в шлаке различных комплексных соединений. В качестве примера Г.Л.Петров приводит два вида возможных соединений, образующихся при сварке: $FeO \cdot SiO_2$ и $(FeO)_2 \cdot SiO_2$. Таким образом, одна молекула диоксида кремния может связать и одну, и две молекулы FeO . Поэтому шлак, состоящий из 50 мол. % SiO_2 и 50% мол. FeO , при $B = 1$ фактически будет кислым.

В формуле Международного института сварки химическая активность отдельных соединений в какой-то степени учтена:

$$B = \frac{CaO + MgO + BaO + SrO + K_2O + Na_2O + CaF_2 + 0,5 MnO + FeO}{SiO_2 + 0,5 Al_2O_3 + TiO_2 + ZrO_2}, \quad (4.58)$$

где CaO, MgO - содержание химического соединения во флюсе, масс. %.

Формула (4.58) широко применяется для определения основности сварочных флюсов.

Капли, образующиеся при дуговой сварке покрытыми электродами, снаружи окутаны шлаком. Обладая кинетической энергией, капли при попадании в сварочную ванну погружаются вглубь, где происходит разделение металла и шлака. Шлак может оказаться внутри сварочной ванны в результате раскислительных процессов. Шлаковые частицы стремятся всплыть на поверхность ванны в связи со своей малой плотностью. Скорость всплывания частиц в спокойном жидком металле определяют по формуле Стокса:

$$\omega = 2,22r^2 g \frac{\rho_1 - \rho_2}{\eta}, \quad (4.59)$$

где r - радиус включения, см;

$g = 981 \text{ см/с}^2$ - ускорение свободного падения;

ρ_1 - плотность металла, для чистого железа $\rho_1 = 7,88 \text{ г/см}^3$;

ρ_2 - плотность шлакового включения, г/см^3 ;

$\dot{\eta}$ - вязкость жидкого металла, Па·с.

Из формулы (4.59) следует, что наиболее влияет на скорость всплывания шлака размер его частиц, так как радиус включения входит в формулу во второй степени.

При пользовании формулой (4.59) следует учитывать, что в условиях сварки наблюдается интенсивное перемешивание жидкого металла, которое понижает точность расчетов. Формулой Стокса можно пользоваться лишь для ориентировочной оценки возможности удаления шлаковых частиц при сварке.

Задачи к разделу 4

4.1 Определить объем углекислого газа, образующегося при диссоциации мрамора электродного покрытия и приходящегося на 1 г расплавленного металла электрода. Диссоциация мрамора при нагреве протекает по формуле $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$. Принять: 1) температура выделяющегося из покрытия газа равна 1200К; 2) коэффициент объемного расширения газа 0,00366 К⁻¹.

Таблица 4.3

Вариант	Относительная масса покрытия $G_{\text{покр}}/G_{\text{пров}}$	Массовая доля мрамора в покрытии, %
1	0,30	25
2	0,33	27
3	0,35	30
4	0,37	32
5	0,40	35
6	0,42	37
7	0,45	40
8	0,43	42
9	0,40	45
10	0,37	47
11	0,35	50
12	0,32	52

4.2 Рассчитать давление насыщенных паров трех чистых металлов по уравнению Клапейрона-Коаузиуса при заданной температуре. По полученным данным построить гистограмму. На основании анализируемых металлов сделать вывод о влиянии температуры кипения на давление насыщенного пара.

Таблица 4.4

Показатели	Вариант											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Температура, К	2700	3500	3400	2300	3000	3600	2800	2900	3100	2600	3200	33
Элементы	Al Cr Fe	Si Ti V	Si V Zr	Al Mn Zr	Fe Zr Si	Ti V Si	Cr Cu Zr	Fe V Ti	Al Cr Cu	Al Cr Cu	V Zr Ti	Ti Si Zr

4.3 Определить содержание кислорода и азота в составе газовой фазы над жидким расплавом железа и легирующего элемента при дуговой сварке на воздухе без защитной среды голой проволокой. Принять следующее: газовая фаза состоит из паров металла и воздуха; суммарное давление паров и воздуха равно 10^5 Па, причем пары вытесняют воздух; в воздухе содержится 80% азота и 20% кислорода; содержание газа в газовой фазе соответствует его парциальному давлению.

Таблица 4.5

Показатели	Вариант											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Легирующий элемент	Mn			Cr			Al			Cu		
Концентрация легирующего элемента, %	5	6	10	5	10	15	2	3	5	1	2	3
Температура, К	2210	2100	2000	2200	2100	2000	2200	2100	2000	2200	2150	2100

4.4 Рассчитать в процентах состав газовой фазы, образующейся при диссоциации углекислого газа, для различных температур. Согласно реакции диссоциации $2CO_2 = 2CO + O_2$ следует, что при разложении двух молей CO_2 образуется два моля CO и один моль кислорода. Построить график, показывающий состав газовой фазы в процентах при различных температурах и общем давлении 10^5 Па.

Таблица 4.6

Показатели	Вариант											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Температура, К	2500	3000	2600	2550	2525	2700	2525	2515	2800	2510	2600	2700
	2900	3250	2900	2850	2850	2900	2825	2865	3080	2810	2950	3000
	3300	3500	3200	3150	3175	3100	3125	3215	3360	3110	3300	3300
	3700	3750	3500	3450	3500	3300	3425	3565	3640	3410	3660	3600
	4100	4000	3800	3750	3825	3500	3725	3915	3920	3710	4000	3900

4.5 Определить степень диссоциации молекулярного газа при различных температурах и атмосферном давлении. Построить график зависимости степени диссоциации газа от температуры.

Таблица 4.7

Показатели	Вариант											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Газ	H ₂			N ₂			O ₂			P ₂		
Температура, К	2000	1900	4000	300	1900	4000	300	1900	4000	300	1900	4000
	3000	2400	4500	600	2400	4500	600	2400	4500	600	2400	4500
	4000	2900	5000	1000	2900	5000	1000	2900	5000	1000	2900	5000
	5000	3400	5500	1400	3400	5500	1400	3400	5500	1400	3400	5500
	6000	3900	6000	1800	3900	6000	1800	3900	6000	1800	3900	6000

4.6 Определить степень диссоциации двухатомного газа при постоянной температуре и изменяющемся давлении, равном: $0,2 \cdot 10^5$; $0,4 \cdot 10^5$; $0,6 \cdot 10^5$; $0,8 \cdot 10^5$; $1,013 \cdot 10^5$ Па. Построить график зависимости степени диссоциации газа от давления.

Таблица 4.8

Показатели	Вариант											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Газ	ОН	HF	HCl	NO	CO	CH	SiO	SiF	MgO	CaO	BaO	LiO
Температура, К	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000	5500	5600	5700	5800	5900

4.7 Определить равновесную концентрацию водорода в металле шва при аргонодуговой сварке, если учесть, что аргон содержит в своем составе влагу. Принять, что металл шва представляет собой чистое железо. Содержание влаги в аргоне, температура системы и концентрация кислорода в шве указаны для каждого варианта.

Таблица 4.9

Показатели	Вариант											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Температура, К	1800	1810	1820	1830	1840	1850	1860	1870	1880	1890	1900	1910
[O, %]	0,020	0,023	0,025	0,027	0,030	0,032	0,035	0,037	0,040	0,042	0,045	0,050
Содержание влаги в аргоне, г/м ³	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,035	0,045	0,055	0,065	0,05	0,06	0,07

4.8 Определить равновесную концентрацию раскислителя при изменении остаточного содержания кислорода в металле шва. Температура постоянна. Построить график зависимости содержания кислорода от равновесной концентрации раскислителя.

Таблица 4.10

Показатели	Вариант											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Температура, К	1800	1850	1900	1800	1900	2000	1800	1900	2000	1800	1900	2000
Раскислитель	Mn			Si			Ti			Al		
Содержание кислорода, %	0,20 0,15 0,10 0,05			0,300 0,225 0,150 0,075			0,020 0,015 0,010 0,005			0,00025 0,00020 0,00015 0,00010		

Приложение А

СТАНДАРТНАЯ ЭНТАЛЬПИЯ ОБРАЗОВАНИЯ И СТАНДАРТНАЯ ЭНТРОПИЯ ВЕЩЕСТВА

Вещество	$\Delta H^0_{298},$ Дж/моль	$S^0_{298},$ Дж/(моль·К)	Вещество	$\Delta H^0_{298},$ Дж/моль	$S^0_{298},$ Дж/(моль·К)
Al_T	0	42,7	H_2O	-241840	188,7
Al_2O_{3T}	-1676800	50,9	H_2S_{Γ}	-20900	193,0
C_T	0	5,7	HF_{Γ}	-270900	173,8
CO_{Γ}	-110599	197,7	MqO_T	-601240	26,9
$CO_{2\Gamma}$	-393777	213,8	$MqCO_{3T}$	-1096200	65,6
CO_T	0	41,6	Mn_T	0	31,8
$CaCO_{3T}$	-1207920	88,8	MnO_T	-384900	60,2
CaS_T	-482700	56,5	MnS_T	-205000	78,2
CaO_T	-239100	52,8	Mn_3N_{2T}	-238000	191,5
Cr_T	0	23,8	$N_{2\Gamma}$	0	191,5
Cr_2O_{3T}	-1141300	81,2	NO_{Γ}	+90400	210,6
Cr_7O_{3T}	-178000	17,4	Na_2O_T	-418261	75,1
Cu_T	0	33,3	Na_2CO_{3T}	-1131525	138,9
CuO_T	-162110	42,6	Ni_T	0	29,9
Cu_2O_T	-173290	93,0	NiS_T	-92880	67,4
CuS_T	-53170	66,6	$O_{2\Gamma}$	0	205,0
Cu_2S_T	-79500	121,0	$S_{2\Gamma}$	129100	227,7
$CuCO_{3T}$	-595400	88,0	Si_T	0	18,7
$F_{2\Gamma}$	0	202,9	SiO_{2T}	-859300	42,1
Fe_T	0	27,2	SiC_T	-66000	16,6
FeO_T	-265000	60,8	Ti_T	0	30,7
Fe_2O_{3T}	-822700	87,5	TiO_{2T}	-943900	50,2
Fe_3O_{4T}	-1118000	146,2	TiN_T	-335000	30,1
FeS_T	-100500	60,3	V_T	0	44,0
Fe_3C_T	-24200	102,0	V_2O_{3T}	-1250000	96,3
$H_{2\Gamma}$	0	130,6	VC_T	-116700	28,2

Примечание. Индексы Т и Г обозначают, соответственно, твердое и газообразное состояние вещества.

Приложение Б

**ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ ДЛЯ РЕАКЦИЙ
ОБРАЗОВАНИЯ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ КОМПОНЕНТОВ
В СТАНДАРТНЫХ СОСТОЯНИЯХ**

Реакция	$\Delta G^0 = M + NT$		Пределы температуры, К
	М, Дж	Н, Дж/К	
$2Al + 3/2O_2 = Al_2O_3$	-1687909	325,150	932...2303
$Ba_{\text{ж}} + 1/2 S_2 = BaS_T$	-544284	123,510	1002...1895
$C_T + 1/2O_2 = CO$	-110960	-89,875	773...2273
$C_T + O_2 = CO_2$	-393260	-2,290	773...2273
$CO_{\text{ж}} + 1/2O_2 = CaO_T$	-641836	110,200	1123...1765
$CaO_T + CO_2 = CaCO_{3T}$	-170577	144,190	973...1473
$Ca_{\text{ж}} + 1/2 S_2 + CaS_T$	-548471	103,920	1112...1757
$Ce_{\text{ж}} + 1/2 S_2 + CeS_T$	-535241	91,020	1071...2723
$2Cr + 1/2O_2 = Cr_2O_{3T}$	-1110884	247,480	1173...1923
$Cr_T + 1/2S_2 = CrS_T$	-202641	56,100	1373...1573
$Cu_T + 1/2 O_2 = CuO_T$	-159852	91,020	298...1356
$2Cu_T + 1/2S_2 = CuS_T$	-115681	76,120	298...703
$2Cu_T + 1/2 S_2 = Cu_2S_T$	-131884	30,280	708...1402
$Fe_{\alpha} + 1/2O_2 + FeO_T$	-262387	63,560	842...1184
$Fe_{\alpha} + 1/2S_2 = FeS_T$	-150350	52,580	412...1179
$Fe_{\gamma} + 1/2O_2 + FeO_T$	-263182	64,220	1184...1650
$Fe_{\gamma} + 1/2S_2 = FeS_T$	-151020	53,340	1179...1261
$N_2 + 1/2S_2 = H_2S$	-91691	50,620	298...2273
$2K_{\text{ж}} + 1/2S_2 = K_2S_T$	-481482	143,610	298...1032
$Mq_T + 1/2O_2 = MqO_T$	-601350	107,390	298...923
$MqO_T + CO_2 = MqCO_{3T}$	-110825	120,160	298...1000
$Mq_T + 1/2S_2 = MqS_T$	-409888	94,450	298...922
$Mn_T + 1/2O_2 = MnO_T$	-385186	73,830	298...1517
$Mn_T + 1/2S_2 = MnS_t$	-296719	76,690	973...1473
$Mo_T + O_2 = MoO_{2T}$	-584435	170,61	298...2500
$Mo_T + S_2 = MoO_{2T}$	-397746	182,13	298...1458
$2Na_{\text{ж}} + 1/2O_2 = Na_2O_T$	-421401	147,12	371...1405
$Na_2O_T + CO_2 = Na_2CO_{3T}$	-297263	118,28	298...1123
$2Na_{\text{ж}} + 1/2S_2 = Na_2S_T$	-439614	144,03	371...1251
$Ni_T + 1/2O_2 = NiO_T$	-234503	85,28	298...1725
$Ni_T + 1/2S_2 = NiS_T$	-146454	72,01	298...773

Продолжение приложения Б

$3Ni_T + S_2 = Ni_3S_{2T}$	-331762	163,33	298...1063
$1/2P_2 + O_2 = PO_2$	-386023	16,29	298...1973
$Pb_{ж} + 1/2S_2 = PbS_T$	-163285	88,09	601...1386
$Si_T + O_2 = SiO_{2T}$	-906555	174,05	848...1298
$Si_T + 1/2S_2 = SiS$	51791	-81,64	973...1685
$Ti_T + O_2 = TiO_{2T}$	-939535	175,76	1000...1950
$2Ti_T + 3/2O_2 = Ti_2O_{3T}$	-1495106	251,21	1000...1950
$Ti_T + 1/2N_2 = TiN_T$	-336536	93,32	298...1943
$2V_T + 3/2O_2 = V_2O_{3T}$	-1231129	239,61	298...2185
$2V_T + 5/2O_2 = V_2O_{5T}$	-1464417	325,31	943...2185
$Zr_T + S_2 = ZrS_{2T}$	-699196	178,36	298...1832

Приложение В

КОЭФФИЦИЕНТЫ ДЛЯ ИНТЕРПОЛЯЦИОННЫХ ФОРМУЛ (4.17)

Газ	K_0	K	$K_2 \cdot 10^4$	K^{-1}	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6	K_7
O_2	9,1126	1,0453	0,2073	-2,5785	-6,6737	15,8290	-29,6389	29,0916	-0,4219	-24,562	14,941
H_2	6,3519	0,5191	0,1183	-2,2609	2,4765	-10,7480	21,8446	-21,9890	2,7874	13,607	-8,355
F_2	8,5092	9,8343	0,9830	-0,8168	-5,9775	16,1260	-35,8950	42,9400	-9,9080	-27,390	19,310
H_2	8,8703	1,0760	-0,8883	-4,9040	-4,7857	7,7988	-9,7634	5,5720	4,0956	-7,551	2,923
BaO	2,6684	-0,7132	2,6120	-3,0417	17,0761	-77,5070	227,6350	-319,3850	115,3460	168,440	-134,670
CO	9,2365	1,0674	-0,5046	-5,5827	-4,8625	7,3986	-7,0747	0,6576	7,2612	-7,846	2,686
CH	6,4970	0,7278	-0,2190	-1,7468	0,1503	-8,0530	24,3320	-32,9870	12,5820	14,380	-11,950
CaO	6,4687	0,4711	0,9460	-2,5850	-3,0637	10,2620	-27,2800	39,1030	-12,1160	-24,530	18,690
HCl	7,7596	1,1444	-1,3130	-2,2133	-3,0325	0,3760	6,8820	-12,9190	6,5030	5,000	-4,870
HP	6,7968	0,6507	0,2640	-2,9384	1,5345	-9,1290	20,5400	-226700	5,3100	11,740	-8,030
MqO	6,9029	0,6953	-0,1090	-2,1870	-1,8117	-12,0940	49,3970	-76,8160	32,2950	30,610	-29,160
NO	8,5327	1,1308	-0,6333	-3,2657	-6,5136	13,6333	-21,9805	18,8564	1,4339	-15,983	8,812
LiO	6,1683	0,4312	1,0820	-7,7215	-1,8581	4,5910	-8,8020	9,4690	0,6300	-11,000	7,610
OH	6,1793	0,5845	0,0380	-2,2181	2,0535	-11,3821	26,7550	-31,6665	9,9422	14,718	-11,224
SiF	6,7607	0,4833	1,4210	-2,7528	-2,1680	4,1050	-3,5830	-2,1910	6,9060	-4,400	0,500
SiO	8,5893	0,9266	0,8800	-4,2101	-5,2565	12,1250	-18,7090	13,3460	4,8750	-14,990	7,350

Приложение Г

**ПАРАМЕТРЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОРЯДКА ДЛЯ РАСТВОРОВ
Н, С, N, О И S В ЖИДКОМ ЖЕЛЕЗЕ ПРИ 1873 К**

Элемент, X	e_C^X	e_H^X	e_N^X	e_O^X	e_S^X
<i>Al</i>	0,043	0,013	0,028	-3,9	0,035
<i>C</i>	0,14	0,06	0,13	-0,13	0,11
<i>CO</i>	0,008	0,002	0,011	0,008	0,003
<i>Cr</i>	-0,024	-0,002	-0,047	-0,04	-0,011
<i>Cu</i>	0,016	0,001	0,009	-0,013	-0,008
<i>Mn</i>	-0,012	-0,001	-0,002	-0,021	-0,026
<i>Mo</i>	-0,008	0,002	-0,011	0,004	0,003
<i>N</i>	0,11	-	0	0,057	0,01
<i>Nb</i>	-0,06	-0,002	-0,06	-0,14	-0,013
<i>Ni</i>	0,012	0	0,01	0,006	0
<i>P</i>	0,051	0,011	0,045	0,07	0,29
<i>S</i>	0,045	0,008	0,007	-0,133	-0,028
<i>Si</i>	0,008	0,027	-0,047	-0,131	0,063
<i>Ti</i>	-	-0,019	-0,53	-0,31	-0,072
<i>V</i>	-0,077	-0,007	-0,093	-0,14	-0,016
<i>W</i>	-0,006	0,005	-0,002	-0,009	0,01

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к практическим занятиям по дисциплине
«ТЕОРИЯ СВАРОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ»
для студентов специальности 6.050504
«Технология и оборудование и сварки»

Составитель

Александр Андреевич Богуцкий

Редактор

Елена Александровна Дудченко

Подп. в печать.

Ризограф. печать

Тираж 100 экз.

Усл.печ.л.

Формат 60x84/16

Уч.-изд.л.

ДГМА. 84313, г. Краматорск, ул. Шкадинова, 72.