

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЛЕГИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ДАВЛЕНИЕ ПАРОВ В КАНАЛЕ ПРОПЛАВЛЕНИЯ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКЕ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

Малюкеева М.Е. – студент, Саломатова Е.С. – молодой ученый
Пермский национальный исследовательский политехнический университет
ООО «Вулкан-Плазма» при Пермском национальном исследовательском политехническом университете

Глубокое проплавление при электронно-лучевой сварке (ЭЛС) характеризуется протеканием сложных физических процессов, из которого важнейшими являются тепловые, гидродинамические и газодинамические процессы.

При сварке с высокой концентрацией мощности электронного пучка в металле возникает глубокий и узкий парогазовый канал. Давление паров металла в этом канале уравновешивается гидродинамическим давлением столба жидкого металла сварочной ванны и давлением, обусловленным поверхностным

натяжением в расплаве [1]:
$$P = \rho h + \frac{2\sigma}{r_k}, \quad (1)$$

где ρ – плотность расплавленного металла; h – глубина проплавления; r_k – радиус канала проплавления в корневой части; σ – поверхностное натяжение металла на границе «жидкость–пар»; P – давление паров металла в канале проплавления.

В работе [2] было показано, что глубина проплавления при одних и тех же энергетических параметрах луча в значительной степени зависит от химического состава свариваемого металла. В связи с этим важной является оценка влияния каждого элемента, входящего в состав того или иного сплава, на давление паров в канале проплавления. Теоретическая термодинамика позволяет получить такие соотношения практически для всех металлических сплавов, используемых в промышленности.

В данной работе представлены термодинамические расчеты влияния теплофизических и химических свойств легирующих элементов на общее давление пара в канале проплавления при ЭЛС высоколегированных сталей.

На металлургические процессы, формирование структуры металла сварного шва и уровень его механических свойств существенное влияние оказывает химический состав свариваемого металла и температурный ре-

жим сварки. При этом важным является исследование изменения содержания легирующих элементов в сплаве в результате их испарения из канала проплавления в процессе ЭЛС.

Исследования проводились при ЭЛС высоколегированных сталей марок 12Х18Н10Т и 09Х16Н4Б, которые широко применяются при изготовлении сварных конструкций в нефтехимической и атомной промышленности [3].

Для исследования была выбрана методика термодинамической оценки связи температуры испарения с давлением паров в канале проплавления при электронно-лучевой сварке [4].

Равновесное давление паров металла в канале проплавления зависит от температуры и химического состава свариваемого металла. Для заданных значений температуры это давление является суммой парциальных равновесных давлений паров железа и легирующих элементов:

$$P_{\text{общ}} = \sum_{i=1}^n P_i. \quad (2)$$

Парциальное равновесное давление пара химического элемента, входящего в состав сплава, определяется по формуле:

$$P_i = P_i^0 \cdot a_i, \quad (3)$$

где P_i^0 – парциальное давление насыщенного пара i -того элемента над чистым элементом, которое может быть представлено в виде уравнения Клапейрона-Клаузиуса:

$$\lg P_i^0 = -\frac{\Delta H_{\text{исп}i}}{2.3 \cdot RT} + B_i, \quad (4)$$

где $\Delta H_{\text{исп}i}$ – энтальпия испарения i -того элемента; R – постоянная газовая; B – для определенного интервала температур, постоянная.

Активность элементов в сплаве определяется по формуле:

$$a_i = X_i \cdot \gamma_i, \quad (5)$$

где X_i – атомная доля i -того элемента;

a_i – коэффициент активности i -того элемента в сплаве.

Ограничиваясь первым параметром взаимодействия, логарифм коэффициент активности i -того элемента в сплаве определяется по формуле:

$$\ln \gamma_i = \ln \gamma_i^0 + \sum_{j=2}^n \varepsilon_i^j \cdot X_j, \quad (6)$$

где $\gamma_i^0 = \gamma_i$ в разбавленном растворе на базе основы сплава;

ε_i^j – параметр взаимодействия элементов j и i в сплаве, получаем

Расчет упругости (равновесного давления насыщенного пара) и состава пара над

жидкой фазой проводились для сталей 12Х18Н10Т и 09Х16Н4Б в интервале температур: от $T_{пл. Fe} = 1812$ К (температура плавления железа) до 3000 К (были взяты значения температур 1812 К, 1873 К, 2400 К и 3000 К). При этом принималось, что основными компонентами пара являлись железо, кремний, марганец, хром и никель.

Расчеты проводились по формуле:

$$P_{iT} = P_{iT}^0 \cdot X_i \cdot \gamma_{iT} \quad (7)$$

Аналогичные расчеты проводились для других температур. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Давление паров элементов над сталью 12Х18Н10Т

Элементы	1812 К	1873 К	2400 К	3000 К
Fe	3,258	6,976	1006,83	$3,45 \cdot 10^4$
Si	$2,8 \cdot 10^{-6}$	$9,2 \cdot 10^{-6}$	0,029	8,59
Mn	1101	1756	$36,902 \cdot 10^3$	$321 \cdot 10^3$
Cr	5,72	11,86	1462,6	5024
Ni	0,149	0,34	72,81	3306
$\sum P, \text{Па}$	1110,2	1775,2	39444,3	363838,6
$\sum P, \text{атм}$	$10,9 \cdot 10^{-3}$	$17,6 \cdot 10^{-3}$	$390,5 \cdot 10^{-3}$	3,6

Результаты расчетов равновесного давления паров для стали 09Х16Н4Б для температур 1873, 2400, 3000 К представлены в табл. 2.

На рисунке 1 и рисунке 2, приведены графики зависимости давления паров легирующих элементов над расплавами сталей от температуры.

Далее производился расчет состава пара. Расчетная формула для определения

состава пара: $\left\{ \%_{об. i} \right\}_T = \frac{P_{i,T}}{P_{об. T}} \cdot 100 \quad (8)$

Таблица 2 – Давление паров элементов над сталью 09Х16Н4Б

Элементы	1812 К	1873 К	2400 К	3000 К
Fe	3,71	7,94	1145,3	$3,9 \cdot 10^4$
Si	$1,6 \cdot 10^{-6}$	$5,89 \cdot 10^{-6}$	0,0188	5,86
Mn	221,4	351,1	7381	$6,4 \cdot 10^4$
Cr	1,688	3,683	576,32	$2,07 \cdot 10^4$
Ni	0,063	0,144	30,91	1415
$P_{общ}, \text{Па}$	226,86	362,87	9133,55	125120,86
$\sum P, \text{атм}$	$2,25 \cdot 10^{-3}$	$3,59 \cdot 10^{-3}$	$90,4 \cdot 10^{-3}$	1,24

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЛЕГИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ДАВЛЕНИЕ ПАРОВ В КАНАЛЕ ПРОПЛАВЛЕНИЯ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКЕ ВЫСОКЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

$P_i \cdot 10^3, \text{Па}$

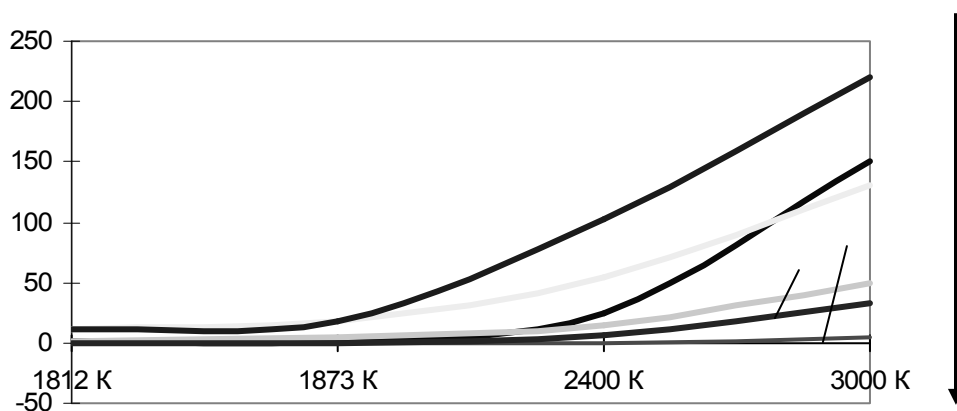


Рисунок 1 – Давление паров над сталью 12X18H10T

$P_i \cdot 10^3, \text{Па}$

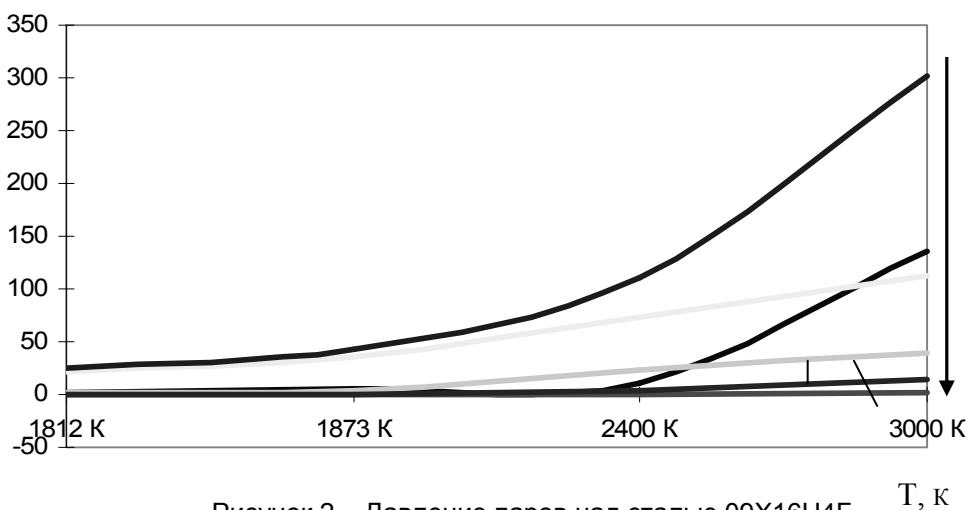


Рисунок 2 – Давление паров над сталью 09X16H4B

Таблица 3 – Состав пара (% об.) над сталью 12X18H10T

Элемент	1812 K	1873 K	2400 K	3000 K
Fe	0,29	0,39	2,55	9,47
Si	$0,25 \cdot 10^{-6}$	$0,52 \cdot 10^{-6}$	$73,5 \cdot 10^{-6}$	0,0023
Mn	99,17	98,92	93,55	88,1
Cr	0,515	0,668	3,71	1,38
Ni	0,013	0,019	0,185	0,9

Таблица 4 – Состав пара (% об.) над сталью 09X16H4B

Элемент	1812 K	1873 K	2400 K	3000 K
Fe	1,64	2,19	12,54	31,17
Si	$2,6 \cdot 10^{-6}$	$1,6 \cdot 10^{-6}$	$205,8 \cdot 10^{-6}$	0,0047
Mn	97,59	96,76	80,81	51,15
Cr	0,744	1,015	6,31	16,54
Ni	0,028	0,0397	0,338	1,131

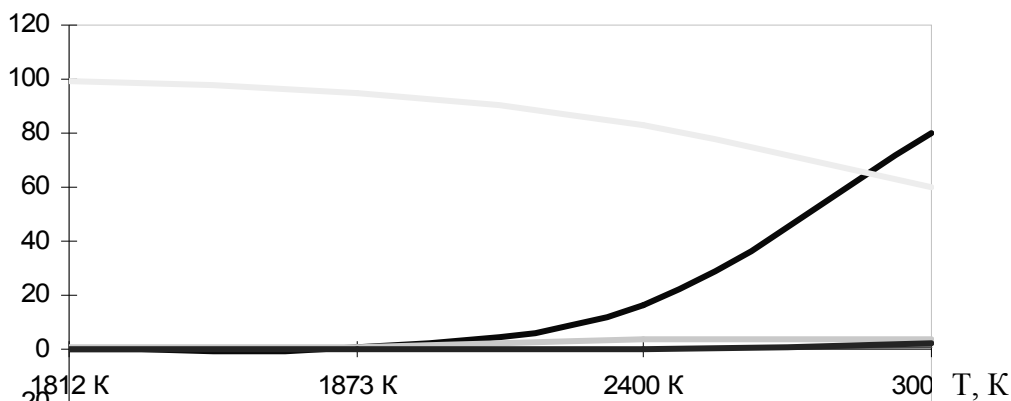


Рисунок 3 – Состав пара над сталью 12X18H10T

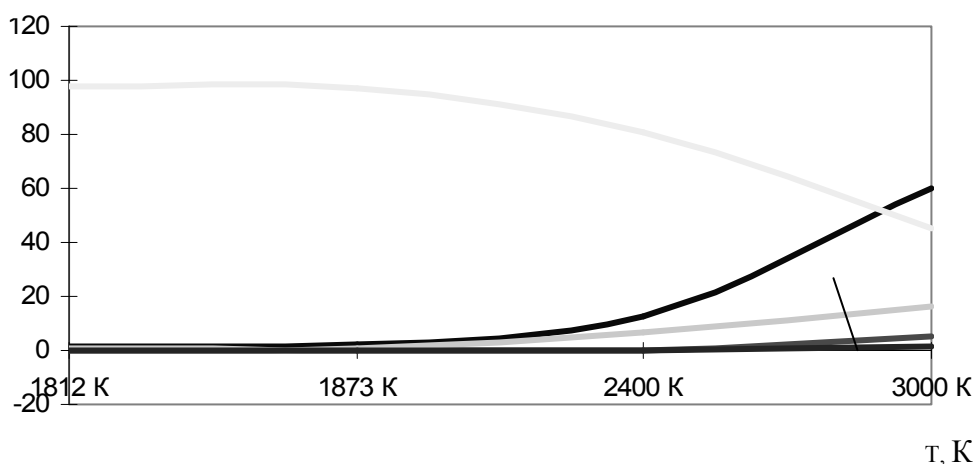


Рисунок 4 –Состав пара над сталью 09X16H4Б

Анализ результатов полученных данных показывает, что при повышении температуры концентрация марганца в сварном шве снижается. Исследования коррозионных свойств сварных соединений, проведенные в работе [5], показали, что с увеличением содержания марганца сопротивление коррозионному разрушению высоколегированных хромоникелевых стали понижается.

По мнению авторов этой работы, марганец может удерживать около себя атомы азота в объеме кристалла, отчего на дислокациях, расположенных по границам зерен, собирается углерод. Это в свою очередь понижает сопротивление высоколегированных хромоникелевых стали коррозионному разрушению.

Таким образом, полученные результаты позволяют сделать следующие выводы

1. При низких температурах в канале проплавления (1812...2400 К) в состав пара входят в основном пары марганца, и для стали 12X18H10T содержание паров марганца

несколько выше (~ 97,2%), чем для стали 9X16H4Б (~ 91,72%). Так как пар сильно обогащен марганцем, то можно прогнозировать уменьшение концентрации марганца в сварном шве, особенно при повышенных температурах. Снижение содержания марганца в сварных швах, полученных при электронно-лучевой сварке, обеспечит повышение сопротивляемости металла коррозионному разрушению.

2. Концентрация паров хрома в канале проплавления выше, чем концентрация паров кремния и никеля, в особенности для стали 9X16H4Б, что может приводить к понижению концентрации хрома в сварном шве и отрицательно влиять на коррозионную стойкость сварных швов, полученных при электронно-лучевой сварке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Язовских В.М., Уточкин В.В. Термодинамическая оценка связи температуры испарения с ПОЛЗУНОВСКИЙ АЛЬМАНАХ № 4/2 2011

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЛЕГИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ДАВЛЕНИЕ ПАРОВ В КАНАЛЕ ПРОПЛАВЛЕНИЯ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКЕ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

давлением пара в канале проплавления при электронно-лучевой сварке. Физика и химия обработки материалов. – 1977. – №2. – С.73 - 77.

2. Ланкин Ю.Н. Оценка температуры и давления паров в канале проплавления при электронно-лучевой сварке. Автоматическая сварка, 1978, № 2, с.16-19.

3. Уратани Й., Такано Д., Наяма М., Шимокусу Й. Применение электронно-лучевой сварки в

атомной промышленности Японии. Автоматическая сварка, 2009, №7, с. 35-44.

4. Уточкин В.В. Примеры решения типовых физико-химических задач в теории сварочных процессов. Ч1. Термодинамические задачи: Учеб. пособие/ Перм. гос. техн. ун-т. Пермь, 2000. 45с.

5. Химушин Ф.Ф. Нержавеющие стали. М.: Металлургия, 1967г. 798с