

В.Я. Беленький, Е.С. Саломатова, М.Е. Малюкеева

Пермский государственный технический университет

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДАВЛЕНИЯ ПАРОВ И СОСТАВА ПАРА В КАНАЛЕ ПРОПЛАВЛЕНИЯ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКЕ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

Рассмотрены термодинамические модели влияния теплофизических и химических свойств легирующих элементов на общее давление пара в канале проплавления при ЭЛС высоколегированных сталей.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, давление паров в канале проплавления, легирующие элементы, термодинамическая оценка, химический состав паров над каналом проплавления.

Важным преимуществом сварки электронным лучом является возможность получения узкой и глубокой зоны проплавления. Процессы, протекающие в канале проплавления, образованном электронным лучом, сложны и многообразны. Интенсивная электронная бомбардировка металла на передней стенке канала проплавления, сопровождающаяся значительным перегревом металла, высокие скорости кристаллизации металла на задней стенке канала проплавления, обуславливающие высокие градиенты температур, наличие паров и газов в канале проплавления и взаимодействие их с электронным лучом, сложные перемещения жидкого металла в канале проплавления в ряде случаев обуславливают недостаточно качественное формирование металла шва [1].

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 режим

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 ЭЛС [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:

$$P_{\text{общ}} = \sum_1^n P_i.$$

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

$$P_i = P_i^0 a_i$$

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

$$\lg P_i^0 = -\frac{\Delta H_{\text{испи}}}{2,3 \cdot RT} + B_i,$$

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

Активность элементов в сплаве определяется по формуле

$$a_i = X_i \gamma_i,$$

где X_i – атомная доля i -го элемента; γ_i – коэффициент активности i -го элемента в сплаве.

Если ограничиться первым параметром взаимодействия, коэффициент активности i -го элемента в сплаве можно определить по формуле

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

где $\gamma_i^0 = \gamma_i$ в разбавленном растворе на базе основы сплава; ε_i^j – параметр взаимодействия элементов j и i в сплаве.

Расчет упругости (равновесного давления насыщенного пара) и состава пара над жидкой фазой проводились для сталей 12X18H10T и 09X16H4Б в интервале температур от 1812 К (температура плавления железа) до 3000 К (были взяты значения температур 1812, 1873, 2400 и 3000 К). При этом принималось, что основными компонентами пара являлись железо, кремний, марганец, хром и никель.

Расчеты проводились по формуле

$$P_{iT} = P_{iT}^0 X_i \gamma_{iT}$$

Расчет равновесного давления для стали 12X18H10T дает следующие значения для температуры 1812 К:

$$P_{Fe,1812} = 4,82 \cdot 0,676 \cdot 1 = 3,26 \text{ Па,}$$

$$P_{Si,1812} = 0,105 \cdot 0,0157 \cdot 0,0017 = 2,8 \cdot 10^{-6} \text{ Па,}$$

$$P_{Mn,1812} = 3,0 \cdot 10^3 \cdot 1,303 \cdot 0,199 = 777,89 \text{ Па,}$$

$$P_{Cr,1812} = 31,02 \cdot 0,189 \cdot 0,974 = 5,71 \text{ Па,}$$

$$P_{Ni,1812} = 2,37 \cdot 0,093 \cdot 0,678 = 0,145 \text{ Па.}$$

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

Таблица 1

Давление паров элементов над сталью 12X18H10T

Элементы	Температура, К			
	1812	1873	2400	3000
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

Расчеты равновесного давления насыщенного пара для стали 09X16H4Б дали следующие значения:

$$P_{Fe,1812} = 4,82 \cdot 0,0046 \cdot 1 = 0,022 \text{ Па,}$$

$$P_{Si,1812} = 0,105 \cdot 0,0118 \cdot 1,86 \cdot 10^{11} = 2,3 \cdot 10^8 \text{ Па,}$$

$$P_{Mn,1812} = 3,0 \cdot 10^3 \cdot 0,0051 \cdot 6,78 = 103,73 \text{ Па,}$$

$$P_{Cr,1812} = 31,02 \cdot 0,1699 \cdot 0,013 = 0,0685 \text{ Па,}$$

$$P_{Ni,1812} = 2,37 \cdot 0,0398 \cdot 24,43 = 2,304 \text{ Па.}$$

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

Таблица 2

Давление паров элементов над сталью 09Х16Н4Б

Элементы	Температура, К			
	1812	1873	2400	3000
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
$P_{\text{общ}}, \text{Па}$	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

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

Далее производился расчет состава пара. Расчетная формула для определения состава пара:

$$\{\%_{\text{об.}i}\}_T = \frac{P_{i,T}}{P_{\text{об.}T}} \cdot 100.$$

При $T=1812$ К для стали 12Х18Н10Т состав пара:

$$\{\%_{\text{об.}Fe}\} = \frac{3,26}{1110,2} \cdot 100 = 0,29,$$

$$\{\%_{\text{об.}Si}\} = \frac{2,8 \cdot 10^{-6}}{1110,2} \cdot 100 = 0,25 \cdot 10^{-6},$$

$$\{\%_{\text{об.}Mn}\} = \frac{1101}{1110,2} \cdot 100 = 99,17,$$

$$\{\%_{\text{об.}Cr}\} = \frac{5,72}{1110,2} \cdot 100 = 0,515,$$

$$\{\%_{\text{об.}Ni}\} = \frac{0,149}{1110,2} \cdot 100 = 0,013.$$

Аналогично рассчитывается состав пара при $T = 1812$ К для стали 09Х16Н4Б:

$$\{\%_{\text{об.}Fe}\} = \frac{3,71}{226,86} \cdot 100 = 1,64,$$

$$\{\%_{\text{об.}Si}\} = \frac{5,89 \cdot 10^{-6}}{226,86} \cdot 100 = 2,6 \cdot 10^{-6},$$

$$\left\{ \%_{\text{об. Mn}} \right\} = \frac{221,4}{226,86} \cdot 100 = 97,59,$$

$$\left\{ \%_{\text{об. Cr}} \right\} = \frac{1,688}{226,86} \cdot 100 = 0,744,$$

$$\left\{ \%_{\text{об. Ni}} \right\} = \frac{0,063}{226,86} \cdot 100 = 0,028.$$

$P_i \cdot 10^3, \text{ Па}$

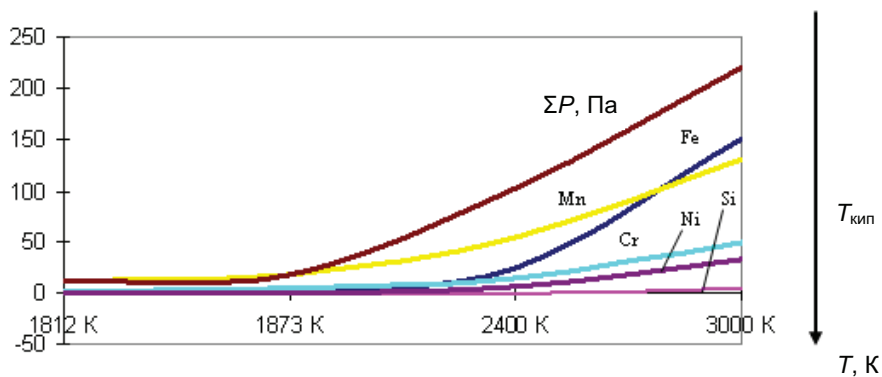


Рис. 1. Давление паров над сталью 12X18H10T

$P_i \cdot 10^3, \text{ Па}$

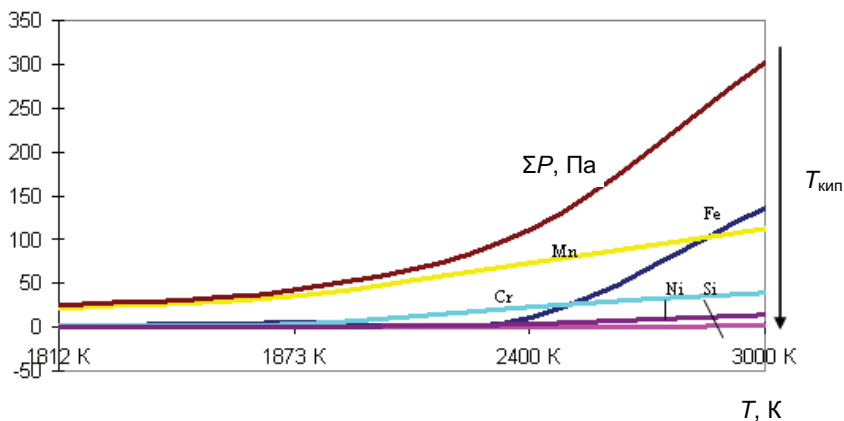


Рис. 2. Давление паров над сталью 09X16H4B

Расчеты для температур 1812, 1873, 2400, 3000 К для сталей 12X18H10T и 09X16H4B приведены в табл. 3, 4.

Таблица 3

Состав пара (об. %) над сталью 12X18H10T

Элемент	Температура, К			
	1812	1873	2400	3000
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 09X16H4Б

Элемент	Температура, К			
	1812	1873	2400	3000
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

На рис. 3, 4 приведены графики, зависимости состава пара над расплавом стали от температуры.

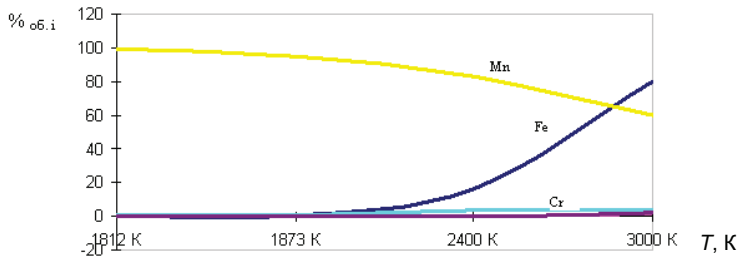


Рис. 3. Состав пара над сталью 12X18H10T

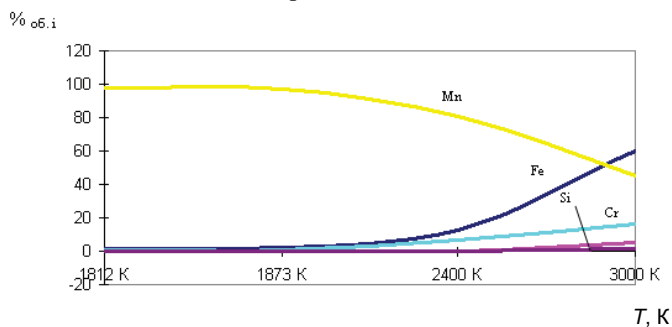


Рис. 4. Состав пара над сталью 09X16H4Б

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 12Х18Н10Т содержание паров марганца несколько выше (около 97,2 %), чем для стали 9Х16Н4Б (около 91,72 %). Поскольку 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 9Х16Н4Б, 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. Сварка в машиностроении: справочник в 4 т. – М.: Машиностроение, 1978 – Т. 1 / под ред. Н.А. Ольшанского. – 1978. – 504 с.
2. Ланкин Ю.Н. Оценка температуры и давления паров в канале проплавления при электронно-лучевой сварке // Автоматическая сварка. – 1978. – № 2. – С. 16–19.
3. Применение электронно-лучевой сварки в атомной промышленности Японии / Й. Уратани, Д. Такано, М. Наяма, Й. Шимокусу // Автоматическая сварка. – 2009. – № 7. – С. 35–44.
4. Уточкин В.В. Примеры решения типовых физико-химических задач в теории сварочных процессов. Ч. 1. Термодинамические задачи: учеб. пособие / Перм. гос. техн. ун-т. – Пермь, 2000. – 45 с.
5. Химушин Ф.Ф. Нержавеющие стали. – М.: Металлургия, 1967. – 798 с.

Получено 27.12.2010