

УДК 669:537.5

**УДАЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ РАСПЛАВА Fe–C (3 мас. %) В ГЕЛИИ
ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ**© 2022 г. А. В. Кайбичев^{а, *}, И. А. Кайбичев^б^аИнститут металлургии УрО РАН, Екатеринбург, Россия^бУральский институт ГПС МЧС России, Екатеринбург, Россия

*e-mail: kaibitchev@mail.ru

Поступила в редакцию 31.05.2021 г.

После доработки 14.09.2021 г.

Принята к публикации 25.09.2021 г.

Изменение веса расплава в электрическом поле зависело от продолжительности его воздействия, полярности расплава и межэлектродного напряжения при одинаковом количестве прошедшего электричества. При отрицательной полярности расплава вес уменьшался на $27.4 \cdot 10^{-3}$ г, при положительной – увеличивался на $40.3 \cdot 10^{-3}$ г. Меньшее удаление элементов из расплава происходило при пониженной (52 В/см) средневременной напряженности электрического поля. Большой перенос элементов в расплав был результатом его повышенного воздействия (85 В/см). Вес расплава возрастал с постоянной скоростью. Удаление элементов из расплава в период опыта замедлялось. Вес расплава в конце опыта при электрическом поле и без него был одинаковым. Железо в межэлектродном переносе не участвовало. Переносимые элементы, их атомность определены по массе одноатомного иона с учетом необходимого для его переноса количества электричества и изменения веса расплава. Необходимое количество электричества являлось частью прошедшего. Оно определено по отношению произведения доли ионов в электричестве и атомного веса элемента к сумме их значений для всех участников переноса. По необходимому количеству электричества и доли ионов определили массы одноатомных ионов. Сумма произведений масс одноатомных ионов на определяемое число атомов в многоатомных ионах дала перенос массы в опыте. Полученные линейные уравнения позволили определить число атомов и массу ионов. Их изменение прослежено в опыте и в период его проведения. Атомность и масса ионов при переносе элементов в расплав почти не изменялась. Начальный перенос массы ионами H_{16}^+ , C_{19}^+ , N_6^+ , O_3^+ в расплав завершали похожие ионы H_{20}^+ , C_{19}^+ , N_6^+ , O_3^+ . Из расплава вначале удалялись ионы H_{29}^+ , C_{29}^+ , N_{13}^+ , O_8^+ , а в период окончания – только C_3^+ . Атомность и состав ионов отражали изменения в поверхностном слое электродов. Окончание удаления ионов с поверхностного слоя расплава завершало очистку. Положительная полярность расплава мешала очистке.

Ключевые слова: водород, углерод, азот, кислород, количество электричества, ионы, напряженность электрического поля, атомность, поверхность, масса, очистка

DOI: 10.31857/S0235010622010042

ВВЕДЕНИЕ

Электрическое поле воздействует на поверхность металлов [1–7]. Проведена атомная очистка поверхности монокристалла в сильном электрическом поле в вакууме [1].

Возникающие на поверхности механические напряжения σ (кг/мм²) в электрическом поле напряженностью E (В/А) рассчитывали по формуле [2]:

$$\sigma = 45.1467 \cdot E^2. \quad (1)$$

Повышая межэлектродное напряжение, можно добиться удаления примесей с поверхности металлов. Напряженность E электрического поля при проникновении в металл на расстояние R (Å) убывает относительно первоначального значения E_0 на поверхности [3]:

$$E = E_0 \exp\left(-\frac{R}{\delta}\right). \quad (2)$$

Экранирующее расстояние δ (Å) для железа – 0.31 Å [4]. Напряженность E электрического поля в металле на глубине R в 2δ , 3δ меньше максимальной E_0 в 7 и 20 раз.

Резкое понижение напряженности электрического поля с глубиной проникновения R происходит и в поверхностном слое металлического расплава. Из поверхностного слоя последовательно удаляются элементы с меньшим, чем у газа-наполнителя потенциалом ионизации. Очередность их удаления определяет поверхностная активность. Сперва удаляются элементы с наружной поверхности.

Перенос элементов в вакууме при электрическом поле подтвердили снимки удаления микронных капелек с поверхности расплавов галлия и индия [5]. Авторы определили атомность удаляемых ионов Ga^+ с 2 до 6 [5], ионов Au^+ с 2 до 7 [6]. Атомность ионов увеличивалась с повышением прошедшего количества электричества. Многоатомные группировки (эктоны) обнаружены при взрыве перегретых микрообъемов металлов в вакууме [7]. Их движение к аноду обеспечивал поток 10^{11} электронов. В приведенных работах [5–7] из металлов удалялись их многоатомные однозарядные ионы. Они увеличивались до капелек с повышением прошедшего количества электричества.

Элементы однокомпонентных расплавов серебра, меди, никеля, железа переносились в гелии при воздействии электрического поля. После удаления примесей начинался перенос ионов исследуемого металла [8, 9]. Интенсивность росла с увеличением прошедшего количества электричества и межэлектродного напряжения.

В данной работе изучается очистка двухкомпонентного расплава Fe–C (3 мас. %) по изменению веса и межэлектродного напряжения при одинаковом прошедшем количестве электричества. В опыте и в короткие периоды его проведения определены удаляемые элементы, их количество и атомность.

ПРОВЕДЕНИЕ ОПЫТА

Изучение удаления водорода, углерода, азота, кислорода из расплава Fe–C (3 мас. %) требовало высокой точности измерений веса расплава и исключения переноса посторонних примесей.

Схема установки по измерению веса расплава в гелии при воздействии электрического поля различной полярности приведена на рис. 1.

Установка позволяла проследить изменение веса 2 г расплава при различных полярностях в зависимости от межэлектродного напряжения при токе 400 мА и температуре 1655°C. Ток и межэлектродное напряжение записывали по показаниям универсального источника питания УИП-1. Стабильность выпрямленного напряжения от 20 до 600 В при токе нагрузки до 600 мА не хуже $\pm 0.5\%$. Расплав находился в тигле 3 из ВеО внутри пластинчатого молибденового электрода 5 диаметром 40 мм. Тигель 3 висел на отградуированной (0.01 г/мм) вольфрам-рениевой пружине 8. Это позволяло по положению метки при точности отсчета 0.001 мм катетометра КМ-8 фиксировать из-

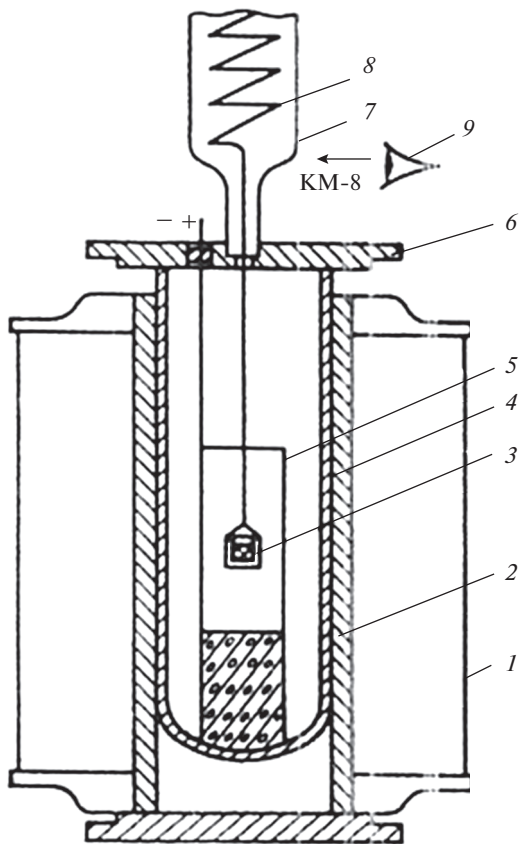


Рис. 1. Схема установки по измерению веса расплава в гелии при воздействии электрического поля различной полярности: 1 – печь сопротивления, 2 – трубчатый графитовый нагреватель, 3 – сплав в тигле BeO , 4 – герметичный алундовый чехол, 5 – пластинчатый молибденовый электрод диаметром 40 мм, 6 – водоохлаждаемая крышка с входными отверстиями и резиновыми уплотнениями, 7 – герметичный цилиндр из молибденового стекла, 8 – пружинные весы из вольфрам-рениевой проволоки, 9 – катетометр КМ-8.

менение веса 10^{-5} г. К расплаву в тигле 3 и молибденовому электроду 5 подведен ток. Измерения проведены при положительной (+), отрицательной (–) полярности расплава и без воздействия электрического поля (0).

Температуру замеряли вольфрам-рениевой термопарой с расположением горячей спая на уровне металлического расплава 3. Опыт проведен в потоке ($1.0\text{--}1.2$ дм³/мин) гелия высокой чистоты. Остатки химически активных элементов поглощала титановая губка в верхней части алундового чехла.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Влияние полярности электрического поля на перенос элементов расплава Fe-C (3 мас. %), напряжения в двухсантиметровом пространстве гелия между молибденовым электродом и расплавом при температуре 1655°C и токе 400 мА приведено на рис. 2. Четкое различие изменения веса расплава и межэлектродного напряжения при различных полярностях убеждает в отсутствии посторонних примесей в гелии и в доста-

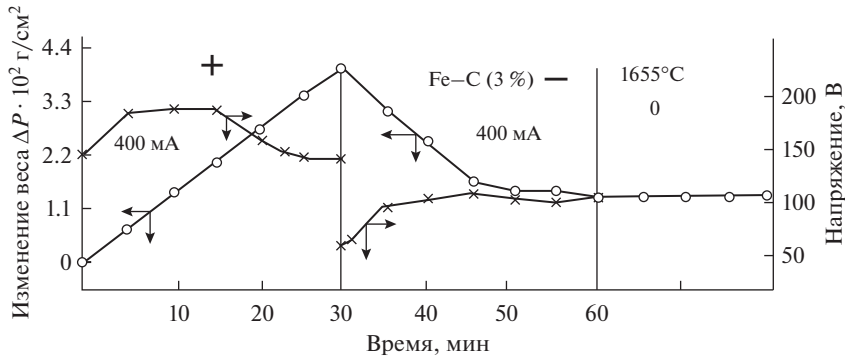


Рис. 2. Изменение массы расплава Fe–C (3 мас. %) и межэлектродного напряжения при различных полярностях в гелии.

точной точности измерений. Вес расплава возрастал при положительной полярности на $40.3 \cdot 10^{-3}$ г и убывал на $27.4 \cdot 10^{-3}$ г при отрицательной. В общем переносе могли участвовать водород, углерод, азот и кислород. Вес расплава после их удаления не изменился в электрическом поле и без него. Железо в переносе не участвовало.

Переносимые элементы, их количество и атомность определены при расчете изменения веса расплава M (г) по произведению числа однозарядных ионов QX/e и атомной массы Am/N_A иона переносимого элемента

$$M = \frac{Q \cdot X}{e} \cdot \frac{A \cdot m}{N_A} \quad (3)$$

Здесь Q – прошедшее количество электричества, Кл; X – доля однозарядных ионов в прошедшем электричестве, e – элементарный заряд, $1.602 \cdot 10^{-19}$ Кл, A – атомный вес переносимого элемента, m – число атомов (молекул) в ионе, N_A – число Авогадро, $6.022 \cdot 10^{23}$ моль $^{-1}$.

После замены eN_A численными значениями из (3) получили

$$M = \frac{Q \cdot X \cdot Am}{96500} \quad (4)$$

Зависимость (4) по межэлектродному переносу M элементов в газах отличается от закона Фарадея для переноса в ионных электролитах. В электролитах переносятся одноатомные ионы с зарядом, соответствующим валентности элемента. В газах переносятся однозарядные ионы с любым определяемым числом атомов (молекул). Перенос в электролитах рассчитывается по всему прошедшему количеству электричества, а в газах по переносимому ионами.

Значения M , Q в зависимости (4) взяты из опыта. Доля X однозарядных ионов в прошедшем количестве электричества определялась по отношению скорости иона W^+ к сумме его скорости и скорости электрона W^- для условий опыта:

$$X\left(\frac{E}{N}, T, P\right) = \frac{W^+(E/N, T, P)}{W^+(E/N, T, P) + W^-(E/N)} \quad (5)$$

Скорость электрона в гелии в основном зависит от напряженности электрического поля. Ее значения приведены в литературе [10].

Скорость иона W^+ находили по приведенной подвижности иона K_0 , напряженности электрического поля E между электродами, температуре T и давлении P [11]:

$$W^+(E, T, P) = 371 \cdot K_0 \cdot E \cdot \frac{T}{P}. \quad (6)$$

Приведенная подвижность водорода – 31.8 [11], углерода – 23.74; азота – 23.56; кислорода – 23.40; железа – 21.00 см²/В · с. Последние рассчитаны по известным подвижностям близких по атомной массе щелочных металлов [12].

Изменение веса M расплава в опыте происходило за счет совместного переноса присутствующих элементов однозарядными ионами разной атомности. Атомность ионов каждого элемента определили по массе одноатомного иона с учетом необходимого для его переноса количества электричества и соответствующего изменения веса расплава. Необходимое количество электричества Q_3 являлось частью прошедшего Q . Оно определено по отношению произведения доли X_3 ионов в электричестве и атомного веса A_3 элемента к сумме их значений всех участников переноса

$$Q_3 = Q \frac{X_3 A_3}{\sum X_3 A_3}. \quad (7)$$

По значениям Q_3 , X_3 и зависимости (4) при $m = 1$ рассчитана масса M_3 одноатомных ионов переносимых элементов. Сумма произведений переноса массы $M_{H, C, N, O}$ элементов одноатомными ионами на определяемое число атомов $m_{H, C, N, O}$ соответствовала переносу массы M в опыте

$$M_H m_H + M_C m_C + M_N m_N + M_O m_O = M. \quad (8)$$

Удаление водорода, углерода, азота, кислорода из расплава снижалось и прекращалось в конце выдержки в электрическом поле (рис. 2). Поверхностный слой с примесями исчезал. Железо совместно с углеродом из расплава не удалялось. В переносе могли участвовать водород, углерод, азот и кислород поверхностного слоя. Атомные массы переносимых ионов определены в опыте и в пяти коротких периодах его проведения (табл. 1). В табл. 1 по данным опыта приведены средневременные межэлектродные напряженности E электрического поля, отношение E к концентрации атомов гелия N в нормальных условиях, прошедшее электричество Q и перенос массы M . Короткие периоды соответствуют очередности времени переноса элементов в расплав (+) и удаления (–). Перенос массы M в опыте и в короткие периоды его проведения равен изменению веса расплава в соответствующее время (рис. 1). По значениям E/N найдены скорости электронов W^- [7]. Скорости ионов W^+ водорода, углерода, азота и кислорода рассчитаны по формуле (3). Доли ионов X в прошедшем электричестве определены (2) по скоростям W^- , W^+ . Разные значения X отражают влияние полярности расплава, напряженности электрического поля и атомного веса элемента.

Далее приведено (табл. 2) необходимое количество электричества Q_3 для переноса одноатомных ионов водорода, углерода, азота и кислорода, рассчитанное по формуле (4). Оно возрастало пропорционально атомному весу переносимого элемента. Сумма Q_3 соответствовала прошедшему количеству электричества Q в опыте и каждом коротком периоде.

Полученные X_3 , Q_3 использованы для расчета массы $M_{H, C, N, O}$ одноатомных ионов по формуле (1). Их значения стали основой двенадцати уравнений. Приведены четыре из уравнений типа (8) при разных полярностях расплава, два по результатам опыта (табл. 2):

$$0.015m_H + 1.250m_C + 1.679m_N + 2.160m_O = 40.3 \cdot 10^{-3} \text{ г}, \quad (9)$$

$$0.01255m_H + 1.0025m_C + 1.338m_N + 1.734m_O = 27.4 \cdot 10^{-3} \text{ г} \quad (10)$$

Таблица 1. Данные для расчета межэлектродного переноса M водорода, углерода, азота и кислорода расплава Fe–C (3 мас. %)

N	T , мин	E , В/см	E/N , Тн	Q , Кл	M , г · 10 ³	Скорость, м/с				Доля X ионов в прошедшем электричестве, 10 ²					
						электрона	H ⁺	C ⁺	N ⁺	O ⁺	H ⁺	C ⁺	N ⁺	O ⁺	
Σ	+	0–30	85.2	0.318	720	40.3	2718	191	143	142	142	6.57	5.00	4.96	4.93
	–	30–60	52.1	0.194	720	27.4	2081	119	87	86	86	5.32	4.01	3.97	3.96
1	+	0–5	83.3	0.309	120	6.7	2686	187	140	139	138	6.51	4.96	4.92	2.87
	–	0–35	41.6	0.155	120	9.2	1848	93	70	69	68	4.81	3.65	3.61	3.58
2	+	5–10	93.2	0.347	120	6.7	2358	209	156	155	154	6.87	5.25	5.17	5.14
	–	35–40	51.7	0.192	120	7.6	2071	116	87	86	85	5.30	4.01	3.99	3.96
3	+	10–15	95	0.352	120	6.7	3092	213	159	158	157	6.45	4.89	4.86	4.83
	–	40–45	54.2	0.202	120	6.5	2150	122	91	90	89	5.36	4.05	4.02	4.00
4	+	15–20	83.3	0.209	120	6.7	2686	187	140	139	138	6.51	4.95	4.92	4.87
	–	45–50	85.9	0.205	120	3.1	2165	124	92	91	91	5.40	4.08	4.05	4.02
5	+	20–30	76.7	0.286	240	13.5	2583	172	131	130	129	6.25	4.84	4.80	4.77
	–	50–60	55.0	0.205	240	1.0	2165	124	92	91	91	5.40	4.08	4.05	4.02

В колонке N (очередность) знак “+” означает положительную полярность расплава, а знак “–” отрицательную.

Таблица 2. Межэлектродный перенос водорода, углерода, азота, кислорода расплава Fe–C (3 мас. %) в гелии

N	Необходимое количество электричества для переноса ионов, Кл				Масса одноатомных ионов, г · 10 ²				Число одноатомных масс в ионах при переносе M				Масса многоатомных ионов в переносе массы M , г · 10 ³				
	H ⁺	C ⁺	N ⁺	O ⁺	H ⁺	C ⁺	N ⁺	O ⁺	H ⁺	C ⁺	N ⁺	O ⁺	H ⁺	C ⁺	N ⁺	O ⁺	
Σ	+	22.01	201.06	232.66	264.27	0.015	1.250	1.679	2.160	2	19	6	3	0.03	23.75	10.044	6.48
	–	22.23	201.08	232.08	264.43	0.01255	1.0025	1.338	1.734	6	15	4	4	0.0745	15.0375	5.352	6.936
1	+	3.55	33.642	38.774	44.04	0.00240	0.2074	0.2767	0.3556	16	19	6	3	0.0384	3.9406	1.6542	1.0668
	–	3.69	33.60	38.77	43.93	0.00184	0.1525	0.2030	0.2607	29	29	13	8	0.05296	4.4285	2.6390	2.0856
2	+	3.67	33.49	38.78	44.06	0.00261	0.2186	0.2908	0.3754	22	19	6	2	0.05742	4.1477	1.7448	0.7508
	–	3.68	33.45	38.83	44.04	0.00203	0.1667	0.2247	0.2891	1	19	12	6	0.0017	3.1673	2.6964	1.7346
3	+	3.67	33.46	38.80	44.07	0.0024	0.2034	0.2735	0.3529	0	17	8	3	0	3.4578	2.188	1.0587
	–	3.69	33.47	38.76	44.08	0.0020	0.1685	0.1685	0.2923	23	17	12	3	0.0466	2.8645	2.712	0.8759
4	+	3.57	33.54	39.89	44.80	0.00241	0.2064	0.2064	0.3552	20	19	6	3	0.0479	3.9210	1.665	1.0656
	–	3.64	33.50	38.85	44.01	0.00264	0.1699	0.1699	0.2933	6	8	5	2	0.0132	1.3592	1.141	0.5866
5	+	7.22	67.06	77.59	88.13	0.00512	0.4360	0.539	0.6970	0	20	5	3	0	8.720	2.695	2.091
	–	7.38	66.98	77.42	88.16	0.00413	0.3338	0.3398	0.5890	0	3	0	0	0	1.020	0	0

В колонке N (очередность) знак “+” означает положительную полярность расплава, а знак “–” отрицательную.

и два для первого короткого периода

$$0.00240m_H + 0.2074m_C + 0.2767m_N + 0.3556m_O = 6.70 \cdot 10^{-3} \text{ г}, \quad (11)$$

$$0.00184m_H + 0.1525m_C + 0.2030m_N + 0.2607m_O = 9.20 \cdot 10^{-3} \text{ г}. \quad (12)$$

Число m атомов, переносимых в расплав и в удаляемых ионах при одинаковом прошедшем количестве электричества отличалось (табл. 2). Атомность ионов при переносе элементов в расплав почти не изменялась. Начальный перенос ионов H_{16}^+ , C_{19}^+ , N_6^+ , O_3^+ в расплав завершали похожие ионы H_{20}^+ , C_{19}^+ , N_6^+ , O_3^+ . Их сходство свидетельствует об отсутствии изменений в поверхностном слое молибденового электрода. Из расплава в начале опыта удалялись ионы H_{29}^+ , C_{29}^+ , N_{13}^+ , O_8^+ , а в период окончания только C_3^+ . Понижение атомности и массы удаляемых ионов убеждают в очистке поверхностного слоя расплава.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Элементы в электрическом поле переносили ионы. Вес расплава в гелии изменялся при воздействии электрического поля. Он возрастал при положительной полярности расплава и убывал при отрицательной. Изменение веса росло с повышением межэлектродной напряженности электрического поля при одинаковом прошедшем количестве электричества. По соответствию экспериментального изменения веса расплава произведению числа однозарядных ионов элемента и его атомной массы определены удаляемые элементы, их количество и атомная масса.

Атомность и масса ионов при переносе элементов с молибденового электрода в расплав почти не изменялись. Начальный перенос в расплав ионов H_{16}^+ , C_{19}^+ , N_6^+ , O_3^+ завершали похожие ионы H_{20}^+ , C_{19}^+ , N_6^+ , O_3^+ . Из расплава Fe—C (3 мас. %) сперва удалялись ионы H_{29}^+ , C_{29}^+ , N_{13}^+ , O_8^+ , а при окончании только C_3^+ . Суммарная масса ионов переносимых элементов совпадала с изменением веса расплава в опыте и в короткие периоды его проведения. Атомность и состав ионов отражали изменения в поверхностном слое электродов. Масса удаляемых из расплава в электрическом поле элементов снижалась до полного удаления газов. Положительная полярность расплава мешала очистке.

Электрическое поле способствовало образованию многоатомных ионов на поверхности электродов. Они многократно увеличивали перенос элементов. Элементы удалялись с поверхности электродов при отрицательной полярности. Удаление поверхностного слоя завершало очистку.

Работа выполнена по Госзаданию Имет УрО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Farnsworth R.H.E. Atomically clean surfaces // *Dechema-Monogr.* 1975. **78**. P. 1537–1548.
2. Mott N.F., Watts-Tolin R. The interface between a metal and electrolyte // *J. Electrochem. Acta.* 1961. № 4. P. 79–107.
3. Friedel J. Electronic structure of primary solid solutions in metals // *Adv. Phys.*, 1954. **3**. P. 446–507.
4. Парсел Э. Электричество и магнетизм. М.: Мир, 1976.
5. Wagner A., Venkatesan T., Petroff P.M., Barr D. Droplet emission in liquid metal ion sources // *J. Vac. Sci. and Technol.* 1981. № 4. P. 1186–1189.
6. Габович М.Д. Жидкометаллические эмиттеры ионов // *Успехи физических наук.* 1983. **140**. № 1. С. 137–151.
7. Месяц Г.А. Эктоны. Екатеринбург: Уральская издательская фирма “Наука”, 1983.
8. Кайбичев А.В., Кайбичев И.А. Удаление ионов Ag^+ , Cu^+ , Ni^+ из металлических расплавов в гелии при электрическом поле постоянного тока // *Расплавы.* 2013. № 3. С. 35–43.
9. Кайбичев А.В., Кайбичев И.А. Очистка расплавов железа от поверхностно-активных элементов в газах при электрическом поле постоянного тока // *Расплавы.* 2014. № 4. С. 28–34.
10. Хаксли П., Кромптон Р. Диффузия и дрейф электронов в газах. М.: Мир, 1977.
11. Мак-Даниэль И., Мэзон Э. Подвижность и диффузия ионов в газах. М.: Мир, 1976.

12. Кайбичев А.В., Кайбичев И.А. Межэлектродный перенос элементов из расплавов в газах в электрическом поле // Расплавы. 2021. № 1. С. 3–9.

REMOVAL OF ELEMENTS FROM MELT Fe–C (3 wt %) IN HELIUM UNDER EXPOSURE TO AN ELECTRIC FIELD

A. V. Kaibichev¹, I. A. Kaibichev²

¹*Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia*

²*Ural Institute of State Fire Service EMERCOM of Russia, Yekaterinburg, Russia*

The change in the weight of the melt in an electric field depended on the duration of its action, the polarity of the melt, and the interelectrode voltage at the same amount of electricity transmitted. With a negative polarity of the melt, the weight decreased by $27.4 \cdot 10^{-3}$ g, with a positive polarity, it increased by $40.3 \cdot 10^{-3}$ g. Less removal of elements from the melt occurred at a reduced (52 V/cm) average-time electric field strength. The greater transfer of elements into the melt was the result of its increased effect (85 V/cm). The weight of the melt increased at a constant rate. The removal of elements from the melt during the experiment was slowed down. The weight of the melt at the end of the experiment with and without an electric field was the same. Iron did not participate in the interelectrode transfer. The transferred elements and their atomicity are determined by the mass of a monatomic ion, taking into account the amount of electricity required for its transfer and the change in the weight of the melt. The required amount of electricity was part of the past. It is determined by the ratio of the product of the fraction of ions in electricity and the atomic weight of an element to the sum of their values for all participants in the transfer. According to the required amount of electricity and the fraction of ions, the masses of monatomic ions were determined. The sum of the products of the masses of monatomic ions by the determined number of atoms in polyatomic ions gave the mass transfer in the experiment. The obtained linear equations made it possible to determine the number of atoms and the mass of ions. Their change was traced in the experiment and during the period of its implementation. The atomicity and mass of ions hardly changed during the transfer of elements into the melt. The initial mass transfer by H_{16}^+ , C_{19}^+ , N_6^+ , O_3^+ ions into the melt was completed by similar ions H_{20}^+ , C_{19}^+ , N_6^+ , O_3^+ . The ions H_{29}^+ , C_{29}^+ , N_{13}^+ , O_8^+ were first removed from the melt, and only C_3^+ during the end period. The atomicity and composition of the ions reflected changes in the surface layer of the electrodes. The end of the removal of ions from the surface layer of the melt completed the purification. The positive polarity of the melt interfered with purification.

Keywords: hydrogen, carbon, nitrogen, oxygen, amount of electricity, ions, electric field strength, atomicity, surface, mass, cleaning

REFERENCES

1. Farnsworth R.H.E. Atomically clean surfaces // Dechema-Monogr. 1975. **78**. P. 1537–1548.
2. Mott N.F., Watts-Tollin R. The interface between a metal and electrolyte // J. Electrochem. Acta. 1961. № 4. P. 79–107.
3. Friedel J. Electronic structure of primary solid solutions in metals // Adv. Phys., 1954. **3**. P. 446–507.
4. Parcel E. Elektrichestvo i magnetizm [Electricity and magnetism]. M.: Mir, 1976. [In Russian].
5. Wagner A., Venkatesan T., Petroff P.M., Barr D. Droplet emission in liquid metal ion sources // J. Vac. Sci. and Technol. 1981. № 4. P. 1186–1189.
6. Gabovich M.D. Zhidkometallicheskiye emitters ionov [Liquid metal ion emitters] // Uspekhi fizicheskikh nauk. 1983. **140**. № 1. P. 137–151. [In Russian].
7. Mesyats G.A. Ektony [Actons]. Yekaterinburg: Ural Publishing Company “Nauka”, 1983. [In Russian].

8. Kaibichev A.V., Kaibichev I.A. Udalenie ionov Ag^+ , Cu^+ , Ni^+ iz metallicheskih rasplavov v gelii pri elektricheskom pole postoyannogo toka [Removal of Ag^+ , Cu^+ , Ni^+ ions from metal melts in helium at a direct current electric field] // Rasplavy. 2013. № 3. P. 35–43. [In Russian].
9. Kaibichev A.V., Kaibichev I.A. Ochistka rasplavov zheleza ot poverkhnostno-aktivnykh elementov v gazakh pri elektricheskom pole postoyannogo toka [Purification of iron melts from surface-active elements in gases at a direct current electric field] // Rasplavy. 2014. № 4. P. 28–34. [In Russian].
10. Huxley P., Crompton R. Diffuziya i dreyf elektronov v gazakh [Diffusion and drift of electrons in gases]. M.: Mir, 1977. [In Russian].
11. McDaniel I., Mason E. Podvizhnost' i diffuziya ionov v gazakh [Mobility and diffusion of ions in gases]. M.: Mir, 1976. [In Russian].
12. Kaibichev A.V., Kaibichev I.A. Mezhelektroodnyy perenos elementov iz rasplavov v gazakh v elektricheskom pole [Interelectrode transfer of elements from melts in gases in an electric field] // Rasplavy. 2021. № 1. P. 3–9. [In Russian].