

УДК 546.261

КИНЕТИКА ОКИСЛЕНИЯ РАСПЛАВОВ НА ОСНОВЕ Ва–Ge КИСЛОРОДОМ ВОЗДУХА

© 2021 г. Н. С. Олимов^а, И. Н. Ганиев^{б, *}^аТаджикский государственный педагогический университет им. С. Айни,
Душанбе, Таджикистан^бИнститут химии им. В.И. Никитина Академии наук Республики Таджикистан,
Душанбе, Таджикистан

*e-mail: ganievizatullo48@gmail.com

Поступила в редакцию 24.04.2021 г.

После доработки 17.05.2021 г.

Принята к публикации 05.06.2021 г.

Методами термогравиметрии, ИК-спектроскопией и рентгенофазовым анализом (РФА) исследована кинетика окисления расплавов Ва–Ge кислородом воздуха. Показано, что добавки германия до 50 мас. % повышают устойчивость сплавов к окислению. Рост температуры способствует увеличению скорости окисления расплавов системы Ва–Ge. Процесс окисления исследуемых расплавов подчиняется параболическому закону. Истинная скорость окисления имеет порядок 10^{-4} кг/м² · с. Кажущаяся энергия активации окисления в зависимости от состава сплавов составляет 39.08–262.0 кДж/моль. Продуктами окисления сплавов являются ВаGe₄O₉ и GeO₂. Установлен механизм влияния германия на кинетику окисления расплавов Ва–Ge. Доминирующую роль в формировании защитной оксидной пленки играет оксид ВаGe₄O₉.

Ключевые слова: сплавы Ва–Ge, термогравиметрия, кинетика окисления, скорость окисления, энергия активации, продукты окисления

DOI: 10.31857/S0235010621050108

ВВЕДЕНИЕ

Решение многих задач современной техники связано с использованием материалов, обладающих высоким сопротивлением окислению. Высокой химической активностью отличаются расплавленные металлы. Так, расплавы алюминия, кремния, германия и щелочноземельных металлов (ЩЗМ) мгновенно вступают в реакцию с кислородом при ничтожно малых значениях его парциального давления. Эти элементы благодаря высокому химическому сродству к кислороду и сере, а также малой растворимости в железе, применяются при обработке стали и чугуна. Однако применение ЩЗМ в чистом виде связано с существенными трудностями. Это, прежде всего, высокая плотность и температура кипения ЩЗМ, возникновение пироэффекта при обработке расплавленной стали, низкое усвоение и неравномерное распределение ЩЗМ. Поэтому, чистые ЩЗМ в металлургии черных металлов имеют весьма ограниченное применение [1–3].

Применение ЩЗМ в виде лигатур на основе кремния имеет существенные преимущества: сокращается время распределения элементов в объеме обрабатываемого металла, повышается использование и раскислительная способность элементов, упрощается аппаратное оформление [4]. Согласно исследованиям [5] система Ва–Ge привлекает внимание исследователей, прежде всего наличием интерметаллидов с не-

обычными типами упорядочения (в частности, клатратными соединениями). Эти соединения демонстрируют своеобразные термоэлектрические и сверхпроводящие характеристики.

Цель настоящего исследования заключается в экспериментальном определении кинетических и энергетических характеристик окисления расплавов на основе Ва–Ge кислородом из газовой фазы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Образцы сплавов для исследования массой 30 г получали в вакуумной печи СНВ-1.31.1/16 в атмосфере инертного газа в корундовых тиглях из бария марки БМ1 (ТУ 48-4-465-85) и монокристаллического германия марки Ge 000. Окисление сплавов в жидком состоянии проводили кислородом воздуха на установке, принцип работы которой описан в работах [6, 7]. Исследование продуктов окисления сплавов выполнено методами ИК-спектроскопии на двухлучевом ИК-спектрофотометре UR-20 в области $400\text{--}4000\text{ см}^{-1}$ и рентгенофазовым анализом (РФА) на установке ДРОН-1.5.

Для проведения исследований тигель с исследуемым металлом помещался в изотермической зоне печи. Температуру повышали со скоростью $2\text{--}3^\circ\text{C}/\text{мин}$. Перед разогревом печи катетометр настраивали на указатель пружины, записывали на шкале точки отчета и в течение нагрева контролировали изменение массы образца. При достижении заданного режима записывали новую точку отчета.

Изменение массы образца фиксировали по растяжению пружины с помощью катетометра КМ-8. В опытах использовались тигли из оксида алюминия диаметром $18\text{--}20\text{ мм}$, высотой $25\text{--}26\text{ мм}$. Тигли перед опытом прокаливали при температуре $1273\text{--}1473\text{ К}$ в окислительной среде в течение 1.5 ч до достижения постоянной массы. Массу образца из исследуемого сплава параллельно контролировали до и после опыта на аналитических весах.

В качестве регистрирующего прибора температуры использовали потенциометр ПП-63. По окончании опыта систему охлаждали, тигель с содержимым взвешивали и определяли реакционную поверхность. Погрешность эксперимента может быть рассчитана из исходной формулы константы скорости окисления

$$k = \frac{m}{S \cdot t^2},$$

где m – масса металла; S – поверхность реагирования; t – время.

Вычисленная относительная ошибка эксперимента складывается из суммы относительных ошибок

$$\frac{\Delta k}{k} = \left(\frac{\Delta m}{m}\right)^2 + \left(\frac{\Delta S}{S}\right)^2 + \frac{\Delta t}{t}.$$

Она составила: $\frac{\Delta k}{k} = (2.71)^2 + (1.5)^2 + 0.027 = 9.62\%$ [1].

Температуру замеряли платина-платинородиевой термопарой, горячий спай которой находился на уровне поверхности образца. Точность измерения температуры принята равной $\pm 2\text{ К}$. Ошибка измерений температуры составила: $\frac{\Delta T}{T} = 2\left(\frac{100}{900}\right) = 0.22\%$. Подробная методика исследования кинетики окисления сплавов описано в работах [8–15].

Таблица 1. Кинетические и энергетические параметры процесса окисления расплавов системы Ва–Ge

Ва	Ge	Температура плавления сплава, К	Температура окисления сплава, К	Истинная скорость окисления $K \cdot 10^4$, кг /м ² · с	Кажущаяся энергия активации, кДж/моль
мас. %					
100.0	0.0	1002	1023	4.8	50.2
			1073	5.8	
			1273	16.6	
96.0	4.0	818	873	4.0	79.9
			923	7.0	
75.0	25.0	1173	1223	10.0	120.6
			1273	17.0	
			1323	13.0	
66.7	33.3	1273	1223	16.0	127.7
			1373	22.0	
			1423	25.0	
50.0	50.0	1418	1473	3.3	262.0
			1523	5.4	
			1573	8.8	
33.3	66.7	1323	1373	11.0	115.2
			1423	17.0	
			1473	13.3	
19.5	80.5	1088	1133	8.0	104.3
			1183	12.0	
			1233	19.0	
8.5	91.5	1173	1273	10.0	72.0
			1323	16.0	
0.0	100.0	1211	1223	4.4	39.8
			1373	4.7	

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Кинетика окисления сплавов системы барий–германий нами исследована во всем диапазоне концентрации компонентов с целью выбора состава лигатур со стабильным составом, отличающихся наименьшей окисляемостью при высоком содержании бария в сплаве [2, 3].

Система барий–германий характеризуется наличием следующих интерметаллических соединений составов Ва₂Ge, Ва₅Ge₃, ВаGe, β-Ва₃Ge₄, ВаGe₂, Ва₃Ge₄ [16] и ВаGe₄ [5]. Соединение ВаGe плавится конгруэнтно. Эвтектика со стороны бария кристаллизуется при 96 мас. % бария и 818 К, а со стороны германия – при 80.5 мас. % германия и 1088 К [17]. Химический состав исследованных сплавов приведен в табл. 1.

Кинетику окисления жидкого сплава эвтектического состава, содержащего 4 мас. % Ge, исследовали при температурах 873 и 923 К. В течение 10 мин увеличение массы образца достигло 40 мг/см², затем процесс окисления протекает по параболическому закону и

Таблица 2. Частоты в ИК-спектрах продуктов окисления расплавов системы Ва–Ge

Содержание германия в барии, мас. %	Частоты, см ⁻¹								
	695	860	1060	1145	1750				
0.0	695	860	1060	1145	1750				
4.0	695	860	1060	1420	1490				
25.0	535	695	725	750	860	1060	1435		
33.3	695	725	750	860	1060	1435			
50.0	530	585	630	695	720	750	860	1120	1145
66.7	530	625	695	730	750	880	1120		
91.5	695	730	750	880	965	1425			
100.0	525	501	585	880	965	1045	1100	1325	

Таблица 3. Фазовый состав продуктов окисления расплавов системы Ва–Ge

Химический состав сплавов до окисления, мас. %		Фазовый состав продуктов окисления
Ва	Ge	
100.0	0.0	BaO
96.0	4.0	BaO
75.0	25.0	BaO + Ba ₂ GeO ₄
66.7	33.3	Ba ₂ GeO ₄
50.0	50.0	BaGeO ₃
33.3	66.7	BaGe ₄ O ₉ + GeO ₂
19.5	80.5	BaGe ₄ O ₉ + GeO ₂
8.5	91.5	BaGe ₄ O ₉ + GeO ₂
0.0	100.0	GeO ₂

характеризуется быстрым образованием защитной оксидной пленки. Максимальное значение величины $\Delta m/S$ равняется 68 мг/см² (рис. 1а), кажущаяся энергия активации достигает значения 79.97 кДж/моль. Оксидная пленка сплава в основном состоит из ВаО (табл. 2 и 3). Сплав, содержащий 25 мас. % Ge окисляли при температурах 1223, 1273 и 1323 К. Характер кривых показывает, что окисление расплава протекает по параболическому закону с диффузионными затруднениями, и процесс заканчивается на 60-й минуте. Максимальное значение величины $\Delta m/S$ равняется 220 мг/см² (рис. 1б). Кажущаяся энергия активации достигает значения 120.6 кДж/моль. Продукты окисления данного сплава состоят из двух фаз: ВаО и Ва₂GeO₄ (рис. 2).

На рис. 1б приведены кинетические кривые окисления жидкого сплава системы Ва–Ge, содержащего 33.3 мас. % Ge (Ва₂Ge) при температурах 1323, 1373 и 1423 К. В течение первых 10 мин окисление протекает по линейному закону, затем приобретает параболический характер.

В штрих-дифрактограммах продуктов окисления рассматриваемого сплава преобладают интенсивности, относящиеся к оксиду германия GeO₂ (рис. 2). Это подтверждается также ИКС-исследованиями (табл. 2).

Это свидетельствует, что первоначально окисление проходило с образованием рыхлой пленки, далее процесс протекал с диффузионными затруднениями. Максимальный привес данного сплава при 1423 К составил 265 мг/см². Истинная скорость окис-

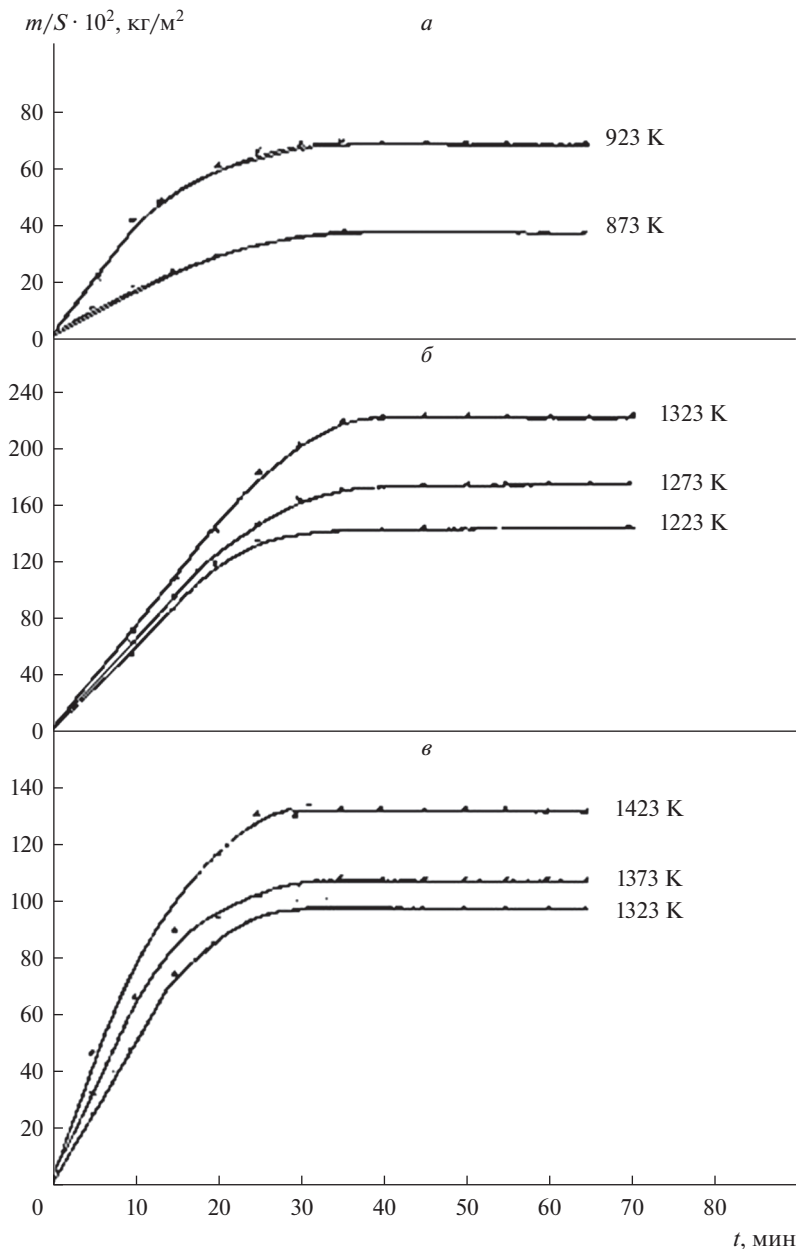


Рис. 1. Кинетические кривые окисления расплавов системы Ва–Ge, содержащих германий, мас. %: а – 4; б – 25; в – 33.3.

ления изменяется от $16 \cdot 10^{-4} \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$ при 1323 К до $25 \cdot 10^{-4} \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$ при 1423 К. Энергия активации окисления исследуемого сплава составляет 70.4 кДж/моль. Методами ИК-спектроскопии и РФА установлено, что оксидная пленка сплава, содержащего 33.3 мас. % Ge, состоит лишь из Ba_2GeO_4 (табл. 2 и 3).

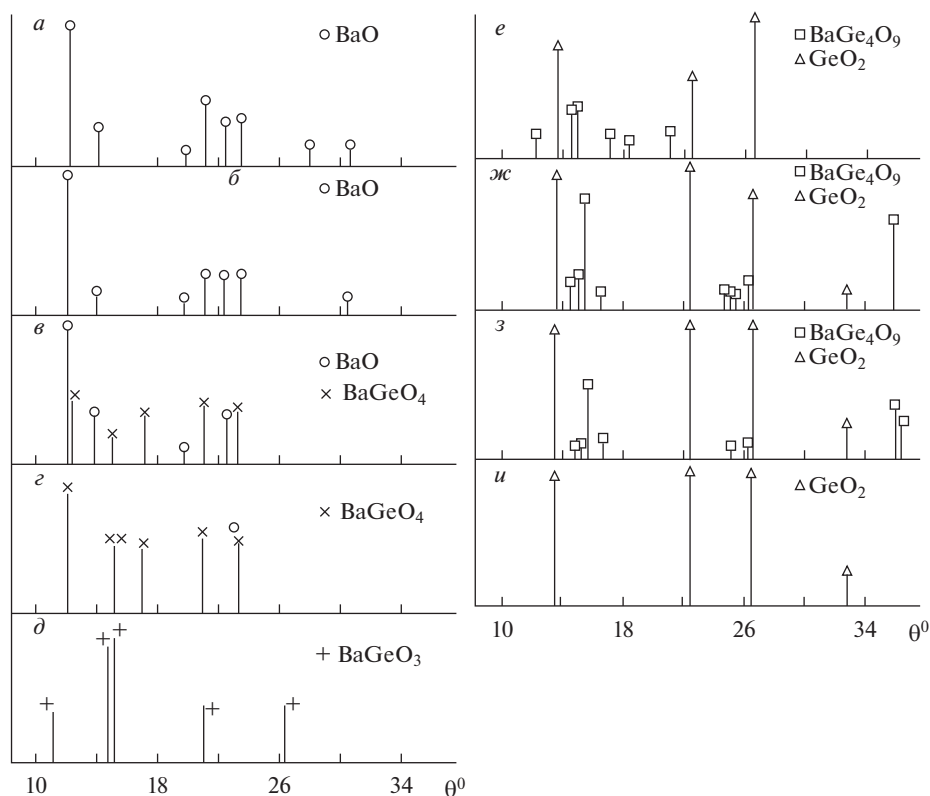


Рис. 2. Штрих дифрактограммы продуктов окисления расплавов системы Ва–Ge, содержащих германий, мас. %.

На рис. 3а приведены кинетические кривые окисления расплава, соответствующего химическому соединению ВаGe (50 мас. % Ge). Исследования проведены при температурах 1473, 1523 и 1573 К. Процесс характеризуется низкими скоростями окисления, кинетические кривые подчиняются параболическому закону, лимитирующим этапом которого являются диффузионные процессы в оксидной пленке.

Для сплава данного состава при температуре 1573 К максимальная величина привеса $\Delta m/S$ равна 34 мг/см², минимальный привес 27 мг/см² соответствует температуре 1473 К. Вычисленное значение энергии активации равняется 262 кДж/моль. Сложный оксид состава ВаGeO₃ образуется лишь при окислении сплава, в котором соотношение Ва : Ge = 1 : 1. Это соотношение сохраняется также между компонентами в продуктах окисления (табл. 1 и 2). Данный оксид отличается высокими защитными свойствами, о чем свидетельствует высокое значение кажущейся энергии активации, равное 262 кДж/моль.

Окисление сплава, содержащего 66.7 мас. % Ge, что соответствует химическому соединению ВаGe₂, с температурой плавления 1323 К изучали при температурах 1373, 1423 и 1473 К (рис. 3б). Характер кривых показывает, что окисление протекает по параболическому закону. Формирование оксидной пленки заканчивается к 30 минутам взаимодействия с кислородом воздуха. Рассчитанные значения истинной скорости окисления изменяется от $11 \cdot 10^{-4}$ до $13.33 \cdot 10^{-4}$ кг/м² · с. Кажущаяся энергия актива-

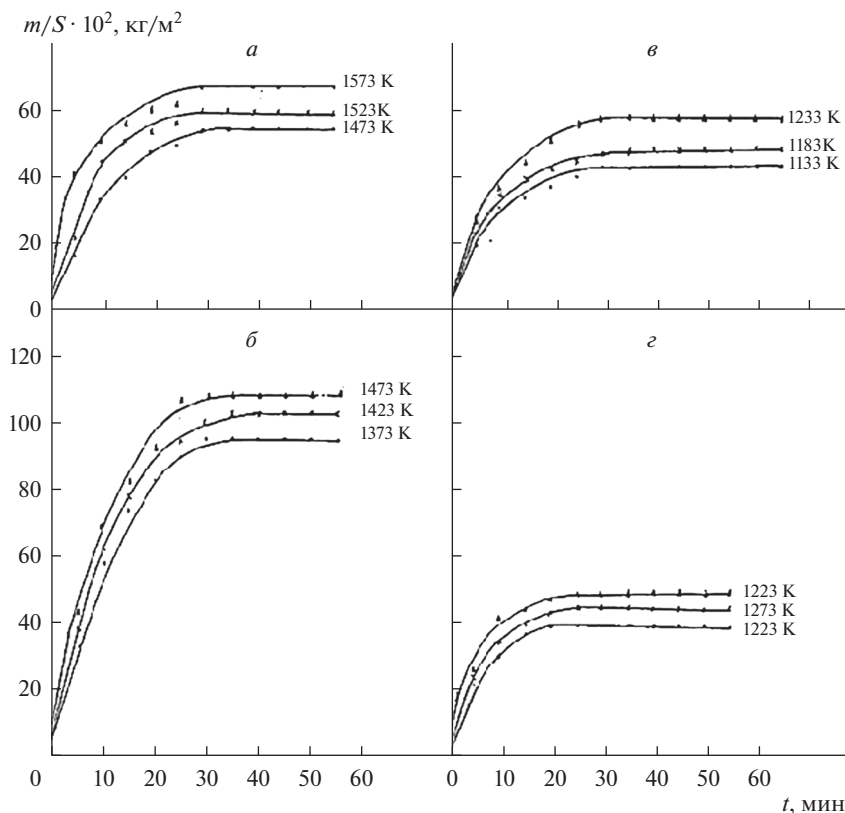


Рис. 3. Кинетические кривые окисления расплавов системы Ba–Ge, содержащих германий, мас. %: а – 50; б – 66.7; в – 80.5; г – 91.5.

ции процесса окисления составляет 115 кДж/моль. Продукты окисления данного сплава состоят из BaGe_4O_9 и GeO_2 (рис. 2).

Появление GeO_2 в составе оксидной пленки несколько ухудшает его защитные свойства, о чем свидетельствует резкое падение величины кажущейся энергии активации от 262 кДж/моль для сплава с 50 мас. % до 115.2 кДж/моль для данного сплава, содержащего 66.7 мас. % Ge.

Кинетика окисления сплава эвтектического состава, содержащего 80.5 мас. % Ge, исследовали при температурах 1133, 1183 и 1233 К. Процесс характеризуется низкими скоростями окисления. Кинетические кривые окисления (рис. 3в) подчиняются параболическому закону. Истинная скорость окисления изменяется от $8 \cdot 10^{-4}$ до $19 \cdot 10^{-4}$ кг/м² · с. Кажущаяся энергия активации равна 104.2 кДж/моль. При окислении данного сплава также образуется смесь оксидов BaGe_4O_9 и GeO_2 , которые обладают невысокими защитными свойствами (рис. 2).

Сплав, содержащий 91.5 мас. % Ge, окисляли при температурах 1223, 1273 и 1323 К. Кинетические кривые (рис. 3г), приближающиеся к параболической зависимости, характеризуют процесс, как взаимодействие металлического расплава с кислородом газовой фазы, который лимитируется диффузионными явлениями, т.е. массопереносом через оксидную пленку, а энергия активации равняется 127.7 кДж/моль.

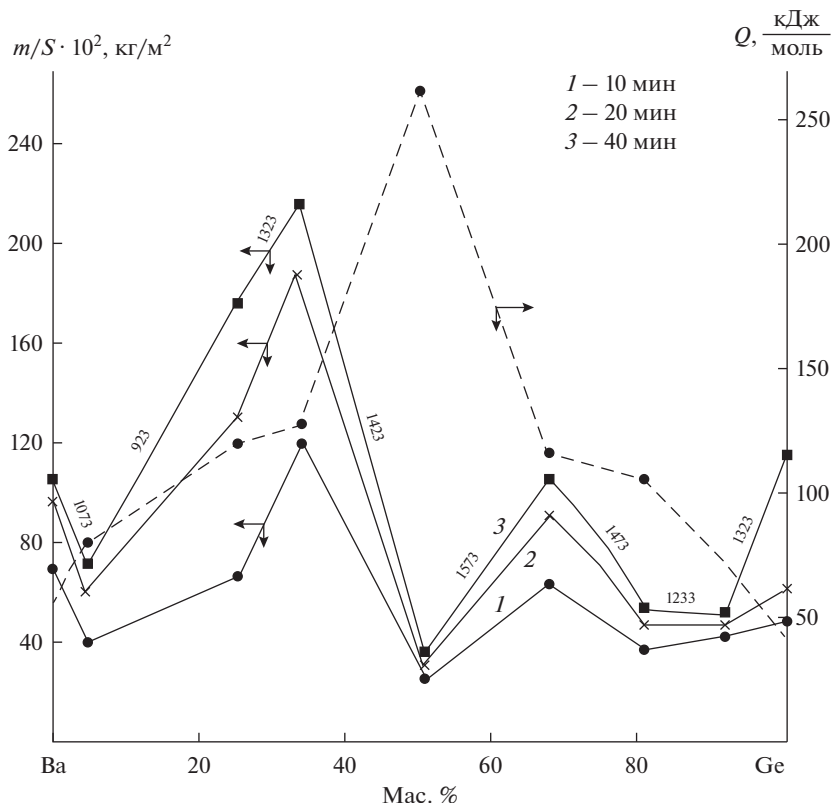


Рис. 4. Изохронны окисления сплавов системы Ва–Ge.

В обобщенном виде изохронны окисления расплавов системы Ва–Ge при 10, 20 и 40 мин приведены на рис. 4. Добавки германия несколько уменьшают скорость окисления жидкого бария, о чем свидетельствует рост энергии активации окисления сплава с 4 мас. % Ge. Добавки бария также уменьшают скорость окисления жидкого германия (табл. 1) за счет образования более сложных оксидов состава BaGe_2O_9 и BaGeO_3 , отличающихся высокими защитными свойствами.

ВЫВОДЫ

1. Методом термогравиметрии исследована кинетика окисления расплавов на основе Ва–Ge кислородом воздуха. Установлено, что добавки германия до 50 мас. % повышает устойчивость расплава к окислению. Скорость окисления сплавов с ростом температуры увеличивается независимо от химического состава. Истинная скорость окисления имеет порядок 10^{-4} кг/м² · с⁻¹. Кажущаяся энергия активации окисления в зависимости от состава сплавов составляет 39.08–262 кДж/моль. Показано, что окисление сплавов починается параболическому закону.

2. Методами РФА и ИКС показано, что продуктами окисления сплавов являются оксиды состава BaGe_4O_9 и GeO_2 . В процессе окисления сплавов доминирующая роль отводится оксиду BaGe_4O_9 .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Липинских Б.М., Киселев В.И. Об окислении жидких металлов и сплавов кислородом из газовой фазы // Изв. АН СССР. Металлы. 1974. № 5. С. 51–54.
2. Вахобов А.В., Ганиев И.Н. Диаграммы состояния двойных систем с участием бария и стронция. Душанбе: Дониш. 1992.
3. Белоусова Н.В., Денисов В.М., Истомин С.А. и др. Взаимодействие жидких металлов и сплавов с кислородом. Екатеринбург: УрО РАН, 2004.
4. Денисов В.М., Истомин С.А., Подкопаев О.И. и др. Германий, его соединения и сплавы. Екатеринбург: УрО РАН. 2002.
5. Violetta K.P., Lydia M.P. Phase diagram of the Ge-rich of the Ba–Ge system and characterisation of single-phase $BaGe_4$ // J. of Alloys and Compounds. 2014. **599**. P. 228–233.
6. Олимов Н.С., Ганиев И.Н., Обидов З.Р., Ширинов М.Ч. Окисление сплавов системы Al–Ge, в жидком состоянии // Расплавы. 2015. № 4. С. 1–8.
7. Ширинов М.Ч., Олимов Н.С., Ганиев И.Н., Джабборов Б.Б. Окисление сплавов системы барий–кремний, в жидком состоянии // Вестник педагогического университета им. С. Айни. 2012. **49**. № 6. С. 37–39.
8. Зокиров Ф.Ш., Ганиев И.Н., Бердиев А.Э., Сангов М.М. Кинетика окисления сплава АК12М2, модифицированного барием, в твердом состоянии // Известия Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический институт). 2020. **81**. № 55. С. 28–33.
9. Бокиев Л.А., Ганиев И.Н., Хакимов А.Х., Джайлоев Дж.Х., Якубов У.Ш. Кинетика окисления алюминиевого сплава АЖ5К10 с церием // Вестник технологического университета (г. Казань). 2020. **23**. № 8. С. 35–38.
10. Ганиев И.Н., Джайлоев Дж.Х., Рашидов А.Р., Якубов У.Ш., Зувайдуллозода Ф.З. Кинетика окисления сплавов алюминия с никелем, в твердом состоянии // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1. Естественные и технические науки. 2020. № 1. С. 104–108.
11. Давлатов О.Ш., Ганиев И.Н., Одиназода Х.О., Раджабалиев С.С. Кинетика окисления алюминиевого сплава АЖ2.4М5.3Мг1.1Ц4Кр3, легированного оловом, в твердом состоянии // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). 2021. **82**. № 56. С. 17–22.
12. Джайлоев Дж.Х., Ганиев И.Н., Ганиева Н.И., Якубов У.Ш., Хакимов А.Х. Кинетика окисления алюминиевого сплава АЖ2.18, модифицированного стронцием // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2019. **40**. № 4. С. 34–39.
13. Назаров Ш.А., Ганиев И.Н., Irene Calliari., Бердиев А.Э., Ганиева Н.И. Кинетика окисления сплава Al + 6%Li, модифицированного лантаном, в твердом состоянии // Металлы. 2018. № 1. С. 34–40.
14. Назаров Ш.А., Ганиев И.Н., Эшов Б.Б., Ганиева Н.И. Кинетика окисления сплава Al + 6%Li, модифицированного церием // Металлы. 2018. № 3. С. 33–38.
15. Ганиев И.Н., Ганиева Н.И., Эшова Д.Б. Особенности окисления алюминиевых расплавов с редкоземельными металлами // Металлы. 2018. № 3. С. 39–47.
16. Benhafid R., Belgacem Bouzida A., Djaballah Y., Candan A., İyigör A., Uğur G. Thermodynamic Modeling of the Al–Ba and Ba–Ge Systems Supported by First-Principles Calculations // J. Phase Equilib. Diffus. 2019. **40**. P. 195–205.
17. Лякишев Н.П., Банных О.А., Рохлин Л.Л. и др. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Д44 Справочник: В 3-х т.: Т. 1. М.: Машиностроение. 1996.

KINETICS OF OXIDATION OF Ba–Ge BASED MELTS BY AIR OXYGEN

N. S. Olimov¹, I. N. Ganiev²¹Tajik State Pedagogical University named after S. Aini, Dushanbe, Tajikistan²Institute of Chemistry named after V.I. Nikitin National Academy of Sciences of Tajikistan, Dushanbe, Tajikistan

The kinetics of oxidation of Ba–Ge melts by atmospheric oxygen has been studied by thermogravimetry, IR spectroscopy and X-ray phase analysis (XPA). It is shown that the addition of germanium up to 50.0 wt % increases the oxidation stability of the melt. An increase in temperature promotes an increase in the rate of oxidation of melts of the Ba–Ge system. The oxidation process of liquid alloys obeys a parabolic law. The true oxidation rate is of the order of 10^{-4} kg/m² · s. The apparent activation energy of oxidation, depending on the composition of the alloys, is 39.08–262.0 kJ/mol. The oxidation products of the alloys are

BaGe₄O₉ and GeO₂. The mechanism of the influence of germanium on the kinetics of oxidation of Ba–Ge melts has been established. The dominant role in the formation of a protective oxide film is played by the BaGe₄O₉ oxide.

Keywords: Ba–Ge alloys, thermogravimetry, oxidation kinetics, oxidation rate, activation energy, oxidation products

REFERENCES

1. Lipinskikh B.M., Kiselev V.I. Ob okislenii zhidkikh metallov i splavov kislorodom iz gazovoy fazy [On oxidation of liquid metals and alloys by oxygen from the gas phase] // *Izv. AN SSSR. Metall.* 1974. № 5. P. 51–54. [In Russian].
2. Vakhobov A.V., Ganiyev I.N. Diagrammy sostoyaniya dvoynykh sistem s uchastiyem bariya i stron-tsiya [State diagrams of binary systems with the participation of barium and strontium]. Dushanbe: Donish. 1992. [In Russian].
3. Belousova N.V., Denisov V.M., Istomin S.A. Vzaimodeystviye zhidkikh metallov i splavov s kisl-orodom [Interaction of liquid metals and alloys with oxygen]. Yekaterinburg: UB RAS, 2004. [In Russian].
4. Denisov V.M., Istomin S.A., Podkopayev O.I. Germaniy, yego soyedineniya i splavy [Germanium, its compounds and alloys]. Yekaterinburg: UB RAS. 2002. [In Russian].
5. Violetta K.P., Lydia M.P. Phase diagram of the Ge-rich of the Ba–Ge system and characterisation of single-phase BaGe₄ // *J. of Alloys and Compounds.* 2014. **599**. P. 228–233.
6. Olimov N.S., Ganiyev I.N., Obidov Z.R., Shirinov M.Ch. Okisleniye splavov sistemy Al–Ge, v zhidkom sostoyaniya [Oxidation of Al–Ge system alloys in liquid state] // *Rasplavy.* 2015. № 4. P. 1–8. [In Russian].
7. Shirinov M.Ch., Olimov N.S., Ganiyev I.N., Dzhaborov B.B. Okisleniye splavov sistemy bariy-kremniy, v zhidkom sostoyanii [Oxidation of alloys of the barium-silicon system, in a liquid state] // *Vestnik pedagogicheskogo universiteta im. S. Ayni.* 2012. **49**. № 6. P. 37–39. [In Russian].
8. Zokirov F.Sh., Ganiyev I.N., Berdiyev A.E., Sangov M.M. Kinetika okisleniya splava AK12M2, modifitsirovannogo bariyem, v tverdom sostoyanii [Kinetics of oxidation of the AK12M2 alloy modified by barium in the solid state] // *Izvestiya Sankt-Peterburgskiy gosudarstvennyy tekhnologicheskii institut (tekhnicheskii institute).* 2020. **81**. № 55. P. 28–33. [In Russian].
9. Bokiyev L.A., Ganiyev I.N., Khakimov A.Kh., Dzhayloyev Dzh.Kh., Yakubov U.Sh. Kinetika okisleniya alyuminiyevogo splava AZH5K10 s tseriyem [Kinetics of oxidation of the aluminum alloy AZH5K10 with cerium] // *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta (g. Kazan’).* 2020. **23**. № 8. P. 35–38. [In Russian].
10. Ganiyev I.N., Dzhayloyev Dzh.Kh., Rashidov A.R., Yakubov U.Sh., Zuvaydulozoda F.Z. Kinetika okisleniya splavov alyuminiya s nikelom, v tverdom sostoyanii [Kinetics of oxidation of alloys of aluminum with nickel, in solid state] // *Vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta tekhnologii i dizayna. Seriya 1. Yestestvennyye i tekhnicheskkiye nauki.* 2020. № 1. P. 104–108. [In Russian].
11. Davlatov O.Sh., Ganiyev I.N., Odinazoda Kh.O., Radzhabaliyev S.S. Kinetika okisleniya alyuminiyevogo splava AZH2.4M5.3Mg1.1TS4Kr3, legirovannogo olovom, v tverdom sostoyanii [Kinetics of oxidation of aluminum alloy AZH2.4M5.3Mg1.1Ts4Kr3, alloyed with tin, in solid state] // *Izvestiya Sankt-Peterburgskiy gosudarstvennyy tekhnologicheskii institut (tekhnicheskii institute).* 2021. **82**. № 56. P. 17–22. [In Russian].
12. Dzhayloyev Dzh.Kh., Ganiyev I.N., Ganiyeva N.I., Yakubov U.Sh., Khakimov A.Kh. Kinetika okisleniya alyuminiyevogo splava AZH2.18, modifitsirovannogo strontsiyem [Kinetics of oxidation of the aluminum alloy AZH2.18 modified with strontium] // *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo industrial’nogo universiteta.* 2019. **40**. № 4. P. 34–39. [In Russian].
13. Nazarov Sh.A., Ganiyev I.N., Irene Calliari, Berdiyev A.E., Ganiyeva N.I. Kinetika okisleniya splava Al + 6%Li, modifitsirovannogo lantanom, v tverdom sostoyanii [Kinetics of solid state oxidation of Al + 6% Li alloy modified with lanthanum] // *Metally.* 2018. № 1. P. 34–40. [In Russian].
14. Nazarov Sh.A., Ganiyev I.N., Eshov B.B., Ganiyeva N.I. Kinetika okisleniya splava Al + 6%Li, modifitsirovannogo tseriyem [Kinetics of oxidation of the Al + 6% Li alloy modified with cerium] // *Metally.* 2018. № 3. P. 33–38. [In Russian].
15. Ganiyev I.N., Ganiyeva N.I., Eshova D.B. Osobennosti okisleniya alyuminiyevykh rasplavov s redkozemel’nymi metallami [Features of oxidation of aluminum melts with rare-earth metals] // *Metally.* 2018. № 3. P. 39–47. [In Russian].
16. Benhafid R., Belgacem Bouzida A., Djaballah Y., Candan A., İyigör A., Uğur G. Thermodynamic Modeling of the Al–Ba and Ba–Ge Systems Supported by First-Principles Calculations // *J. Phase Equilib. Diffus.* 2019. **40**. P. 195–205.
17. Lyakishev N.P., Bannykh O.A., Rokhlin L.L. Diagrammy sostoyaniya dvoynykh metallicheskikh sistem [Diagrams of the state of double metal systems]. Handbook: V. 1. M.: Mashinostroyeniye. 1996. [In Russian].