

УДК 546-31:621:641:666:822

Я. С. Тищенко, М. С. Глабай, А. О. Макудера, С. М. Лакиза, О. В. Дуднік
Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, відділ фізико-хімії і технології тугоплавких оксидів, вул. Кржижанівського, 3, Київ-142, 03680, Україна, e-mail: tyshjana@ukr.net

ФАЗОВІ РІВНОВАГИ В СИСТЕМАХ $Al_2O_3-TiO_2-Y(Er)_2O_3$ ПРИ 1400 °С

Вперше побудовано ізотермічні перерізи діаграм стану систем $Al_2O_3-TiO_2-Y(Er)_2O_3$ при 1400 °С. Триангуляція систем визначається фазою $Y(Er)_2Ti_2O_7$, яка знаходиться в рівновазі зі сполуками Al_2TiO_5 , $Y(Er)_3Al_5O_{12}$, $Y(Er)AlO_3$, $Y(Er)_4Al_2O_9$ та компонентами системи TiO_2 і Al_2O_3 . Системи триангулюються на шість вторинних трикутників, в яких очікується наявність трифазних евтектик, а на п'яти квазібінарних перерізах систем слід очікувати існування квазіподвійних евтектик.

Ключові слова: Керамічні матеріали, фазові рівноваги, ізотермічні перерізи, діаграми стану.

ВСТУП

Одним з основних напрямків розвитку сучасного матеріалознавства є розробка нових оксидних керамічних матеріалів для машинобудування, енергетичної, хімічної, авіакосмічної, електронної та інших галузей у багатокомпонентних системах, в тому числі з участю TiO_2 , Al_2O_3 (AL) та оксидів РЗЕ. Основою ж створення нових матеріалів є вивчення фізико-хімічної взаємодії, яку відображають діаграми стану відповідних систем.

В системі $Al_2O_3-TiO_2$ існує сполука Al_2TiO_5 (AT, тіаліт), яка має унікальні властивості, зокрема аномально низький коефіцієнт термічного розширення, порівнянний з таким для SiO_2 [1]. Це дозволяє створювати на її основі ряд матеріалів для автомобільної промисловості, в'язкої кераміки [2], носіїв каталізаторів, високостійкої до зношування та корозійностійкої кераміки [3] та ін. Низька здатність до спікання та невисока міцність тіаліту ставить питання про створення композиційних матеріалів з його участю.

В системах $TiO_2-Ln(Y)_2O_3$ виявлено ряд сполук, але найбільший інтерес привертають сполуки зі структурою типу пірохлору $Ln_2Ti_2O_7$. Так, сполука $Y_2Ti_2O_7$ (YT_2) є іонним провідником і перспективна як потенціальний електроліт для твердооксидних паливних елементів (ТОПЕ), а також іммобілізуючий матеріал для ядерної галузі [3]. Композити на основі системи $TiO_2-Y_2O_3$ перспективні як покриття з низькою емісійною здатністю і перспективні для використання в автомобілебудуванні для ізоляції гарячих зон двигунів, що дозволяє зменшувати розміри останнього і використовувати пластики в їх конструкціях [4]. В системі $TiO_2-Er_2O_3$ виявлено ряд сполук, але найбільший інтерес привертає сполука зі структурою типу пірохлору $Er_2Ti_2O_7$ (ErT_2), яка цікава за своїми спектроскопічними властивостями [5], має властивості електрохімічного зберігання водню [6], та широко застосовується як фотонний матеріал (лазери, телекомунікації, оптичні пристрої та ін.) [7]. В пірохлорі спостерігається значно менша енергія фононів, ніж у діоксиді кремнію, що дозволяє звести до мінімуму радіаційне поглинання матеріалів [8, 9].

Діаграму стану системи $Al_2O_3-TiO_2-Y_2O_3$ вивчено досить детально та описано [10]. Дані про діаграму стану системи $Al_2O_3-TiO_2-Er_2O_3$ в літературі відсутні.

Метою даної роботи є побудова ізотермічних перерізів діаграм стану систем Al_2O_3 - TiO_2 - $Y(Er)_2O_3$ при 1400 °С, що є частиною систематичних досліджень з побудови діаграм стану систем Al_2O_3 - TiO_2 - Ln_2O_3 , де Ln = (La, Nd, Gd, Er, Yb та Y).

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Зразки для досліджень готували хімічним методом. Вихідними речовинами слугували $Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ з вмістом основної речовини 98 % Донецького заводу хімреактивів, TiO_2 з вмістом основної речовини 99,95 % Донецького заводу хімреактивів та $Y(Er)_2O_3$ з вмістом основної речовини 99,99 Дослідного заводу Фізико-хімічного інституту НАН України (м. Одеса).

Зважені на аналітичних вагах ВЛР-200 з точністю до 0,0005 г необхідні кількості речовин розчиняли у воді з додаванням декількох крапель концентрованої азотної кислоти, осаджували аміачною водою, висушували, прожарювали у повітрі при 800 °С з метою видалення вологи та органічних речовин, і одержаний порошок пресували в таблетки діаметром і висотою 5 мм. Для побудови ізотермічних перерізів зразки відпалювали у повітрі в печі Nabertherm GmbH LHT 08/17 (Німеччина) при 1400 °С впродовж 80 год.

Рентгенофазовий аналіз (РФА) виконано на установці ДРОН-1.5 ($Cu_{K\alpha}$ -випромінювання, Ni-фільтр) зі швидкістю сканування 1/4–4 град/хв в інтервалі кутів 2θ від 15 до 100 град. Інтенсивність ліній оцінювали візуально за десятибальною шкалою, або в процентах за відносною висотою піків на дифрактограмі. Фазовий аналіз зразків проводили з використанням карток X-Ray Powder Diffraction File.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Аналіз відпалених при 1400 °С зразків діаграми стану системи Al_2O_3 - TiO_2 - Y_2O_3 (таблиця) показав, що, за даними РФА, зразки 14 та 15 містять три фази: AlT , TiO_2 та YT_2 , отже вони знаходяться в однойменному конодному трикутнику. Зразок 16 містить дві фази AlT та YT_2 , що свідчить про велику ймовірність квазібінарності перерізу AlT - YT_2 . Зразки 1, 8 та 17 трифазні ($AlT+YT_2+AL$), що свідчить про їх належність до конодного трикутника AlT - AL - YT_2 . У зразках 2, 3, 9, 10 та 19, крім фаз AL та YT_2 , знайдено фазу $Y_3Al_5O_{12}$ (Y_3A_5), кількість якої була найбільша у зразках 9 та 10. РФА цих зразків свідчить про знаходження у конодному трикутнику AL - YT_2 - Y_3A_5 . Наявність за даними РФА в зразку 18 двох фаз YT_2 та AL свідчить про велику ймовірність квазібінарності перерізу AL - YT_2 . Зразки 4, 11, 20 трифазні ($Y_3A_5+YT_2+YA$) і їхні склади відносяться до однойменного конодного трикутника. Наявність за даними РФА трьох фаз YA , YT_2 та $Y_4Al_2O_9$ (Y_2A) у зразках 5, 12 та 13 свідчить про належність складів цих сплавів до конодного трикутника YA - YT_2 - Y_2A . Зразок 21 містить дві фази: YT_2 та Y_2A , що підтверджує велику ймовірність квазібінарності перерізу YT_2 - Y_2A . Зразок 6 містить дві фази Y_2A та Y_2TiO_5 (YT), і це свідчить про поділ вторинного трикутника Y_2A - YT_2 - C - Y_2O_3 на два: Y_2A - YT_2 - YT та YT - Y_2A - C - Y_2O_3 . Відповідно, у зразках 7 та 22 виявлено фази Y_2A , C - Y_2O_3 та YT .

Ізотермічний переріз діаграми стану системи Al_2O_3 - TiO_2 - Y_2O_3 при 1400 °С наведено на рис. 1. На цьому перерізі знайдено тринадцять областей, з яких шість вузьких двофазних AlT - YT_2 , AL - YT_2 , Y_3A_5 - YT_2 , YA - YT_2 , Y_2A - YT_2 , Y_2A - YT , та

Таблиця

Фазовий склад зразків систем $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-Y(Er)}_2\text{O}_3$,
за даними рентгенофазового аналізу

Номер	Склад, % (мол.)			Фазовий склад	
				Температура відпалу, °C	
	Al_2O_3	TiO_2	$\text{Y(Er)}_2\text{O}_3$	1400	
1	45	45	10	$\text{AT+YT}_2+\text{AL}$	$\text{AT+ErT}_2+\text{AL}$
2	37,5	37,5	25	$\text{AL+YT}_2+\text{Y}_3\text{A}_5$	$\text{AL+ErT}_2+\text{Er}_3\text{A}_5$
3	33,25	33,25	33,5	$\text{AL+YT}_2+\text{Y}_3\text{A}_5$	$\text{AL+ErT}_2+\text{Er}_3\text{A}_5$
4	30	30	40	$\text{Y}_3\text{A}_5+\text{YT}_2+\text{YA}$	$\text{Er}_3\text{A}_5+\text{ErT}_2+\text{ErA}$
5	25	25	50	$\text{YA+YT}_2+\text{Y}_2\text{A}$	$\text{ErA+ErT}_2+\text{Er}_2\text{A}$
6	20	20	60	$\text{Y}_2\text{A+YT}_2+\text{C-Y}_2\text{O}_3$	$\text{Er}_2\text{A+ErT+C-Er}_2\text{O}_3^*$
7	15	15	70	$\text{Y}_2\text{A+YT}_2+\text{C-Y}_2\text{O}_3$	$\text{Er}_2\text{A+ErT+C-Er}_2\text{O}_3$
8	75	20	5	$\text{AT+YT}_2+\text{AL}$	$\text{AT+ErT}_2+\text{AL}$
9	60	20	20	$\text{AL+YT}_2+\text{Y}_3\text{A}_5$	$\text{AL+ErT}_2+\text{Er}_3\text{A}_5$
10	50	20	30	$\text{AL+YT}_2+\text{Y}_3\text{A}_5$	$\text{AL+ErT}_2+\text{Er}_3\text{A}_5$
11	40	20	40	$\text{Y}_3\text{A}_5+\text{YT}_2+\text{YA}$	$\text{Er}_3\text{A}_5+\text{ErT}_2+\text{ErA}$
12	30	20	50	$\text{YA+YT}_2+\text{Y}_2\text{A}$	$\text{ErA+ErT}_2+\text{Er}_2\text{A}$
13	25	20	55	$\text{YA+YT}_2+\text{Y}_2\text{A}$	$\text{ErA+ErT}_2+\text{Er}_2\text{A}$
14	10	80	10	$\text{AT+TiO}_2+\text{YT}_2$	$\text{AT+TiO}_2+\text{ErT}_2$
15	15	70	15	$\text{AT+TiO}_2+\text{YT}_2$	$\text{AT+TiO}_2+\text{ErT}_2$
16	20	60	20	AT+YT_2	AT+ErT_2
17	22	56	22	$\text{AT+YT}_2+\text{AL}$	$\text{AT+ErT}_2+\text{AL}$
18	25	50	25	AL+YT_2	$\text{AL+ErT}_2+\text{AT}^*$
19	30	40	30	$\text{AL+YT}_2+\text{Y}_3\text{A}_5$	$\text{AL+ErT}_2+\text{Er}_3\text{A}_5$
20	45	10	45	$\text{Y}_3\text{A}_5+\text{YT}_2+\text{YA}$	$\text{Er}_3\text{A}_5+\text{ErT}_2+\text{ErA}$
21	16	34	50	$\text{Y}_2\text{A+YT}_2$	$\text{Er}_2\text{A+ErT}_2$
22	10	20	70	$\text{Y}_2\text{A+YT}_2+\text{C-Y}_2\text{O}_3$	$\text{Er}_2\text{A+ErT+C-Er}_2\text{O}_3$

* сліди

сім трифазних: TiO_2 - AT - YT_2 , AT - YT_2 - AL , AL - YT_2 - Y_3A_5 , Y_3A_5 - YT_2 - YA , YA - YT_2 - Y_2A , Y_2A - YT_2 - YT та Y_2A - YT - C - Y_2O_3 .

РФА відпалених при 1400 °С зразків діаграми стану системи Al_2O_3 - TiO_2 - Er_2O_3 (таблиця) показав, що зразки 14 та 15 містять три фази: AT , TiO_2 та ErT_2 , отже вони знаходяться в конодному трикутнику AT - TiO_2 - ErT_2 . Зразок 16 за даними РФА містить дві фази AT , ErT_2 , що свідчить про велику імовірність квазібінарності перерізу AT - ErT_2 . Зразки 1, 8 та 17 трифазні (AT + AL + ErT_2), що свідчить про їх належність до конодного трикутника AT - AL - ErT_2 . Наявність за даними РФА в сплаві 18 фаз ErT_2 , AL та слідів AT свідчить про невелике зміщення складу зразка з напрямку квазібінарного перерізу AL - ErT_2 в бік зростання вмісту TiO_2 . У зразках 2, 3, 9, 10 та 19, крім фаз AL та ErT_2 , знайдено фазу $Er_3Al_5O_{12}$ (Er_3A_5), кількість якої була найбільша у зразках 9 та 10. Це свідчить про знаходження складів вищевказаних зразків у конодному трикутнику AL - ErT_2 - Er_3A_5 . Зразки 4, 11 та 20 містять три фази: Er_3A_5 , ErT_2 та $ErAlO_3$ (ErA) що з урахуванням вищевказаних висновків підтверджує велику імовірність квазібінарності перерізу Er_3A_5 - ErT_2 . Зразки 5, 12 та 13 містять три фази ErA , ErT_2 та $Er_4Al_2O_9$ (Er_2A), що свідчить про знаходження складів цих зразків у конодному трикутнику ErA - ErT_2 - Er_2A . Зразок 21 є двофазним (Er_2A + ErT_2). Наявність за даними РФА фаз ErT , Er_2A та слідів фази Er_2O_3 у зразку 6 вказує на невелике зміщення складу зразка з напрямку умовно квазібінарного перерізу ErT - Er_2A в бік збільшення вмісту Er_2O_3 . Зразки 7 та 22 за даними РФА містили по три фази: Er_2A , ErT та C - Er_2O_3 .

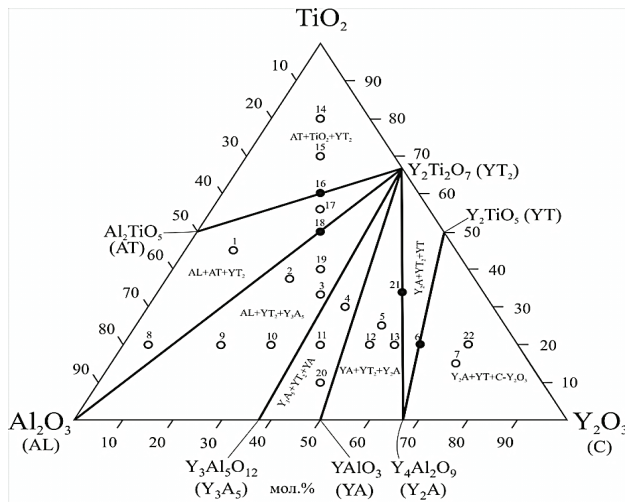


Рис. 1. Ізотермічний переріз діаграми стану системи Al_2O_3 - TiO_2 - Y_2O_3 при 1400 °С:
● – двофазні зразки, ○ – трифазні зразки.

Одержані результати дозволили побудувати ізотермічний переріз діаграми стану системи Al_2O_3 - TiO_2 - Er_2O_3 при 1400 °С (рис. 2). Він містить тринадцять областей, з яких шість вузьких двофазних AT - ErT_2 , AL - ErT_2 , Er_3A_5 - ErT_2 , ErA - ErT_2 , Er_2A - ErT_2 , Er_2A - ErT , та сім трифазних: TiO_2 - AT - ErT_2 , AT - ErT_2 - AL , AL - ErT_2 - Er_3A_5 , Er_3A_5 - ErT_2 - ErA , ErA - ErT_2 - Er_2A , Er_2A - ErT_2 - ErT , Er_2A - ErT - C - Er_2O_3 .

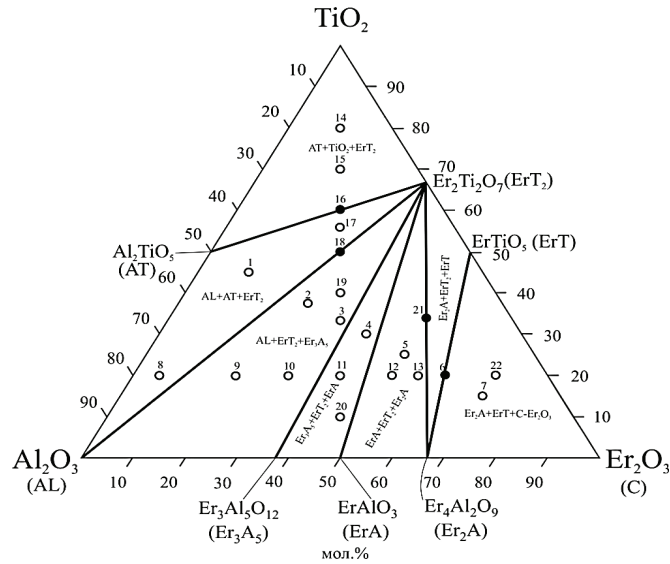


Рис. 2. Ізотермічний переріз діаграми стану системи $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-Er}_2\text{O}_3$ при $1400\text{ }^\circ\text{C}$:
● – двофазні зразки, ○ – трифазні зразки.

ВИСНОВКИ

Таким чином, в результаті проведеного дослідження встановлено фазові рівноваги в системі $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-Y(Er)}_2\text{O}_3$ при $1400\text{ }^\circ\text{C}$, які представлено у вигляді ізотермічних перерізів діаграм стану систем при вказаній температурі. Аналіз відпалених зразків показав, що, за даними РФА, зразки діаграми стану системи $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$ свідчать про значну подібність з діаграмою стану системи $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-Er}_2\text{O}_3$. Це зумовлено подібністю подвійних обмежуючих діаграм стану систем та близькими розмірами іонних радіусів ($\text{Y}^{3+} = 0.892\text{ \AA}$ та $\text{Er}^{3+} = 0.881\text{ \AA}$) [11].

ПОДЯКА (ACKNOWLEDGMENTS)

«Публікація містить результати досліджень, проведених за грантом Президента України за конкурсним проектом (Ф70/104-2017) Державного фонду фундаментальних досліджень»

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Thomas H.A.J., Stevens R. Aluminium Titanate – A Literature Review. Part 3: Preparation of Powders // Br. Ceram. Trans. J. – 1989. – Vol. 88. – P. 229-233.
2. Cano I.G., Dosta S., Miguuel J.R., Guilemany J.M. Production and characterization of metastable $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ ceramic materials // J. Mater. Sci. – 2007. – Vol. 42. – P. 9331-9335. <http://dx.doi.org/10.1007/s10853-007-1871-8>
3. Zang F.X., Manoun B., Saxena S.K. Pressure-induced order-disorder transitions in pyrochlore $\text{RE}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ (RE=Y, Gd) // Mater. Letter. – 2006. – Vol. 60. – P. 2773-2776. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matlet.2006.01.095>
4. Keller M.H., Arduini-Schuster M., Manara J. Determination of the infrared-optical properties of absorbing and scattering pigments at elevated temperatures // High. Temp. High. Press. – 2009. – Vol. 38. – P. 297-314.

5. Langlet M., Coutier C., Fick J., Audier M., Meffre W., Jacquier B., Rimet R. Sol-gel thin films deposition and characterization of a new optical active compound $Er_2Ti_2O_7$ // J. Optic. Mater. – 2001. – Vol. 16. – P. 463-473. [http://dx.doi.org/10.1016/S0925-3467\(01\)00007-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0925-3467(01)00007-6)
6. Zhang L., Weiguang Z., Junwu Z., Qingli H., Chao X., Xujie Y., Lude L., Xin W. Synthesis of $Er_2Ti_2O_7$ nanocrystals and its electrochemical hydrogen storage behavior // J. Alloys Compoud. – 2009. – Vol. 480. – P. L45-L48. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2009.02.146>
7. Martos M., Julian-Lopez B., Condoncillo E., Escribano P. Structural and spectroscopic study of a new pink chromium-free $Er_2(Ti,Zr)_2O_7$ ceramic pigment // J. Am. Ceram. Soc. – 2009. – Vol. 92, N 12. – P. 2987-2992. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1551-2916.2009.03335.x>
8. Langlet M., Jenouvrier P., Fick J., Rimeta R. Aerosol-gel deposition of optically active thin films in the system $Y_2Ti_2O_7$ - $Er_2Ti_2O_7$ // J. Sol-Gel Scien. Technol. – 2003. – Vol. 26. – P. 985-988. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1020713514086>
9. Li Y.H., Wang Y.Q., Xu C.P., Valdez J.A., Tang M., Sickafus K.E. Microstructural evolution of the pyrochlore compound $Er_2Ti_2O_7$ induced by light ion irradiations // Nucl. Instrum. Met. Phys. Res. B. – 2012. – Vol. 286. – P. 218-222. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nimb.2011.12.034>
10. Tishchenko Ya.S., Lakiza S.M., Red'ko V.P., Dudnik O.V. Isothermal section of the Al_2O_3 - TiO_2 - Y_2O_3 phase diagram at 1500 and 1400 °C // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 2017. – Vol. 55, N 11/12. – P. 698-706. <http://dx.doi.org/10.1007/s11106-017-9857-9>
11. Shannon R.D., Prewitt C.T. Effective ionic radii in oxides and fluorides // Acta Cryst. – 1969. – Vol. B25, N 5. – P. 924-946. <http://dx.doi.org/10.1107/S0567740869003220>

Стаття надійшла до редакції 25.07.2017

Я. С. Тищенко, М. С. Глабай, А. А. Макудера, С. Н. Лакіза, Е. В. Дудник

Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины, отдел физико-химии и технологии тугоплавких оксидов, ул. Кржижановского, 3, Киев-142, 03680, Украина, e-mail: tyshjana@ukr.net

ФАЗОВЫЕ РАВНОВЕСИЯ В СИСТЕМАХ Al_2O_3 - TiO_2 - $Y(Er)_2O_3$ ПРИ 1400 °C

Впервые построены изотермические сечения диаграмм состояния систем Al_2O_3 - TiO_2 - $Y(Er)_2O_3$ при 1400 °C. Триангуляция системы определяется фазой $Y(Er)_2Ti_2O_7$, которая находится в равновесии с соединениями Al_2TiO_5 , $Y(Er)_3Al_5O_{12}$, $Y(Er)AlO_3$, $Y(Er)_4Al_2O_9$ и компонентами системы TiO_2 и Al_2O_3 . Системы триангулируются на шесть вторичных треугольников, в которых ожидается наличие трехфазных эвтектик, а на пяти квазибинарных сечениях систем следует ожидать существования квазидвойных эвтектик.

Ключевые слова: Керамические материалы, фазовые равновесия, изотермические разрезы, диаграммы состояния.

I. S. Tyshchenko, M. S. Glabay, A. A. Makudera, S. M. Lakiza, E. V. Dudnik

Frantsevich Institute for Problems of Materials Science, Ukraine NASU, Kiev, Department of Physical chemistry and refractory oxides technology, 3 Krzhizhanovsky str., Kyiv, 03680, Ukraine, e-mail: tyshjana@ukr.net

PHASE EQUILIBRIA IN THE Al_2O_3 - TiO_2 - $Y(Er)_2O_3$ SYSTEMS AT 1400 °C

The aim of this investigation is the construction of isothermal sections for the Al_2O_3 - TiO_2 - $Y(Gd)_2O_3$ phase diagrams at 1400°C as part of systematic investigations of Al_2O_3 - TiO_2 - Ln_2O_3 (Ln=lanthanides, Y) systems. The 1400°C was taken as the temperature, at which no liquid

phases are expected in the both systems. The isothermal sections at 1400 °C for the Al_2O_3 – TiO_2 – $Y(Er)_2O_3$ phase diagrams were constructed for the first time. Samples were prepared by a chemical method. Samples were annealed in air at 1400°C for 80 hours and cooled in the furnace. This temperature value was selected with a view to provide possibility of phase transformations character studies. New phases and appreciable solubility regions based on the components and binary compounds were not found, as predicted. Triangulation of the systems is determined by the phase $Y(Er)_2Ti_2O_7$, which is in equilibria with compounds Al_2TiO_5 , $Y(Er)_3Al_5O_{12}$, $Y(Er)AlO_3$, $Y(Er)_4Al_2O_9$ and components TiO_2 and Al_2O_3 . The structures of isothermal sections of the both systems are similar. The systems are triangulated into six secondary triangles, in which three-phase eutectic are expected. In five quasibinary sections two-phase eutectic should expect to exist. The obtained results will make a significant contribution to the understanding of interactions between the components in the systems studied. This systems offer a number of promising opportunities such as high-temperature structural composites based on directionally solidified two-phase and three-phase eutectic materials, solid electrolytes (SOFCs, oxygen sensors, film for electronic devices, etc.), promising to accumulate water, immobilizing materials for nuclear industry, tough ceramics, catalysts carriers, wear- and corrosion-resistant ceramic coatings and super refractories.

Keywords: Ceramic materials, phase equilibria, isothermal sections, phase diagram.

REFERENCES

1. Thomas H.A.J., Stevens R. *Aluminium Titanate – A Literature Review. Part 3: Preparation of Powders*. Br. Ceram. Trans. J., 1989, vol. 88, pp. 229-233.
2. Cano I.G., Dosta S., Miguuel J.R., Guilemany J.M. *Production and characterization of metastable Al_2O_3 - TiO_2 ceramic materials*. J. Mater. Sci, 2007, vol. 42, pp. 9331-9335. <http://dx.doi.org/10.1007/s10853-007-1871-8>
3. Zang F.X., Manoun B., Saxena S.K. *Pressure-induced order-disorder transitions in pyrochlore $RE_2Ti_2O_7$ ($RE=Y, Gd$)*. Mater. Letter, 2006, vol. 60, pp. 2773-2776. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matlet.2006.01.095>
4. Keller M.H., Arduini-Schuster M., Manara J. *Determination of the infrared-optical properties of absorbing and scattering pigments at elevated temperatures*. High. Temp. High. Press, 2009, vol. 38, pp. 297-314.
5. Langlet M. Coutier C., Fick J. Audier M., Meffre W., Jacquier B., Rimet R. *Sol-gel thin films deposition and characterization of a new optical active compound $Er_2Ti_2O_7$* . J. Optic. Mater, 2001, vol. 16, pp. 463-473. [http://dx.doi.org/10.1016/S0925-3467\(01\)00007-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0925-3467(01)00007-6)
6. Zhang L., Weiguang Z., Junwu Z., Qingli H., Chao X., Xujie Y., Lude L., XinW. *Synthesis of $Er_2Ti_2O_7$ nanocrystals and its electrochemical hydrogen storage behavior*. J. Alloys Compound., 2009, vol. 480, pp. L45-L48. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2009.02.146>
7. Martos M., Julian-Lopez B., Condoncillo E., Escribano P. *Structural and spectroscopic study of a new pink chromium-free $Er_2(Ti,Zr)_2O_7$ ceramic pigment*. J. Am. Ceram. Soc, 2009, vol. 92, no 12, pp. 2987-2992. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1551-2916.2009.03335.x>
8. Langlet M., Jenouvrier P., Fick J., Rimeta R. *Aerosol-gel deposition of optically active thin films in the system $Y_2Ti_2O_7$ - $Er_2Ti_2O_7$* . J. Sol-Gel Scien. Technol., 2003, vol. 26, pp. 985-988. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1020713514086>
9. Li Y.H., Wang Y.Q., Xu C.P., Valdez J.A., Tang M., Sickafus K.E. *Microstructural evolution of the pyrochlore compound $Er_2Ti_2O_7$ induced by light ion irradiations*. Nucl. Instrum. Met. Phys. Res. B, 2012, vol. 286, pp. 218-222. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nimb.2011.12.034>
10. Tishchenko Ya.S., Lakiza S.M, Red'ko V.P., Dudnik O.V. *Isothermal section of the Al_2O_3 - TiO_2 - Y_2O_3 phase diagram at 1500 and 1400 °C*. Powder Metallurgy and Metal Ceramics, 2017, vol. 55, no 11/12, pp. 698-706. <http://dx.doi.org/10.1007/s11106-017-9857-9>
11. Shannon R.D., Prewitt C.T. *Effective ionic radii in oxides and fluorides*. Acta Cryst, 1969, vol. B25, no 5, pp. 924-946. <http://dx.doi.org/10.1107/S0567740869003220>