

**А.О. Макудера,
С.М. Лакиза,
О. В. Дуднік,
М. І. Гречанюк**

ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ ТВЕРДОГО РОЗЧИНУ НА ОСНОВІ ZrO_2 В ПРИСУТНОСТІ КОМПЛЕКСНОГО СТАБІЛІЗАТОРУ

Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України

Анотація

Метою роботи є дослідження можливості використання для ТБП складно-композиційної кераміки на основі ZrO_2 , комплексно легovanого сумішшю оксидів РЗЕ ітрієвої підгрупи.

Для дослідження обрано порошки складу (ваг %): 70 М- ZrO_2 + 30 ВК. ВК – це суміш оксидів РЗЕ ітрієвої підгрупи, складу (ваг.%): 13,3 Y_2O_3 , 1,22 Tb_4O_7 ; 33,2 Dy_2O_3 ; 8,9 Ho_2O_3 ; 21,8 Er_2O_3 ; 1,86 Tm_2O_3 ; 12,5 Yb_2O_3 ; 0,57 Lu_2O_3 ; сумарний вміст інших оксидів – 6,65 (у тому числі 3,2 Al_2O_3).

Сучасні дослідження по створенню нових матеріалів керамічного шару ТБП пов'язані з використанням нанокристалічних порошоків на основі ZrO_2 . В них утворення тетрагонального твердого розчину на основі ZrO_2 проходить в інтервалі 700 – 850°С. Для визначення впливу дисперсності вихідного порошку ZrO_2 на фазові перетворення суміші складу (ваг %): 70 М- ZrO_2 + 30 ВК в процесі термічної обробки при 800 °С використано два порошки М- ZrO_2 : нанокристалічний гідротермальний порошок та дрібнозернистий порошок, що випускається промисловістю. Суміші готували керамічним методом та випалювали при 800 °С протягом 2 – 18 год. Відбір проб здійснювався через кожні 2 години. Для дослідження властивостей сумішей використано методи рентгенофазового та мікроструктурного аналізів. Визначено, що утворення Т- ZrO_2 розпочинається після витримкигод. Морфологія порошоків змінюється топологічно безперервно, процес термічної обробки супроводжується спіканням порошоків.

Одержані результати буде використано при створенні керамічного шару ТБП, нанесеного методом електронно-променевого випаровування-конденсації (атомно-молекулярного осадження парів в вакуумі (ЕВ-РВД))

Ключові слова: термобар'єрні покриття, середньоентропійна оксидна кераміка, діоксид цирконію, оксиди рідкоземельних елементів, легування оксидами ітрієвої підгрупи, комплексне легування ZrO_2 .

Для термозахисту металевих деталей турбін та двигунів внутрішнього згорання в авіаційних та промислових газотурбінних двигунах застосовують термобар'єрні покриття (ТБП). Дослідження ТБП розширюють з метою їх застосування у різних типах озброєнь та у атомній енергетиці. Сучасні ТБП, які використовують для захисту лопаток газових турбін, складаються, в основному, з внутрішнього металевого жаростійкого (товщиною 50–125 мкм) і зовнішнього керамічного (товщиною 80–1000 мкм) шарів, між якими розташовується термічно вирощений шар, переважно Al_2O_3 (товщиною 0,5–10 мкм). Поєднання металевих та керамічних матеріалів покращує теплоізоляційні характеристики та стійкість до термічного циклювання ТБП в процесі експлуатації [1].

Матеріалом керамічного шару ТБП, який широко досліджено і постійно удосконалюється є твердий розчин на основі ZrO_2 , стабілізованого (6 - 8 мас.%) Y_2O_3 (YSZ) але температура його використання обмежена 1200 °С. Підвищення робочої температури високопотужних газотурбінних двигунів наступного покоління передбачає зростання робочої температури до 1500-1600 °С, що піднімає питання розробки нових матеріалів для керамічного шару ТБП з більш низькою теплопровідністю [2]. Матеріали для керамічного шару ТБП на основі ZrO_2 ,

стабілізованого оксидами рідкісноземельних елементів, привертають велику увагу завдяки їхній низькій теплопровідності та фазовій стабільності при високих температурах. Для підвищення термічної довговічності матеріалу керамічного шару ТБП з твердих розчинів на основі ZrO_2 при більш високих температурах, інтерес представляють оксиди рідкісноземельних елементів (РЗЕ) ітрієвої підгрупи (Gd_2O_3 , Tb_4O_7 , Dy_2O_3 , Ho_2O_3 , Er_2O_3 , Tm_2O_3 , Yb_2O_3 , Lu_2O_3) [3].

Мета роботи: дослідження можливості використання для ТБП складно-композиційної кераміки на основі ZrO_2 , комплексно легованого сумішшю оксидів РЗЕ ітрієвої підгрупи.

Для дослідження обрано порошки складу (ваг %): 70 М- ZrO_2 + 30 ВК. ВК – це суміш оксидів РЗЕ ітрієвої підгрупи, складу (ваг.%): 13,3 Y_2O_3 , 1,22 Tb_4O_7 ; 33,2 Dy_2O_3 ; 8,9 Ho_2O_3 ; 21,8 Er_2O_3 ; 1,86 Tm_2O_3 ; 12,5 Yb_2O_3 ; 0,57 Lu_2O_3 ; сумарний вміст інших оксидів – 6,65 (у тому числі 3,2 Al_2O_3).

Сучасні дослідження по створенню нових матеріалів керамічного шару ТБП пов'язані з використанням нанокристалічних порошоків на основі ZrO_2 . В них утворення тетрагонального твердого розчину на основі ZrO_2 проходить в інтервалі 700 – 850 °С. Для визначення впливу дисперсності вихідного порошку ZrO_2 на фазові перетворення суміші складу (ваг %) : 70 М- ZrO_2 + 30 ВК в процесі термічної обробки при 800 °С використано два порошки М- ZrO_2 : нанокристалічний гідротермальний порошок та дрібнозернистий порошок, що випускається промисловістю. Суміші готували керамічним методом та випалювали при 800 °С протягом 2 – 18 год. Відбір проб здійснювався через кожні 2 години. Для дослідження властивостей сумішей використано методи рентгенофазового та мікроструктурного аналізів. Визначено, що утворення Т- ZrO_2 розпочинається після витримки 14 год. Морфологія порошоків змінюється топологічно безперервно, процес термічної обробки супроводжується спіканням порошоків.

Одержані результати буде використано при створенні керамічного шару ТБП, нанесеного методом електронно-променевого випаровування-конденсації (атомно-молекулярного осадження парів в вакуумі (ЕВ-РВД)).

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Nandi A. and Ghosh S. Advanced Multi-layered Thermal Barrier Coatings. *An Overview Journal of Materials Science Research and Reviews*. 2019. 2(3), P. 1-17, Article no. JMSRR.45533. DOI: [10.9734/JMSRR/2019/45533](https://doi.org/10.9734/JMSRR/2019/45533).
2. Ke Rena Qiankun Wanga, Gang Shao, Xiaofeng Zhao, Yiguang Wang. Multicomponent high-entropy zirconates with comprehensive properties for advanced thermal barrier coating. *Scripta Materialia*. 2020. Vol. 178, No.15. P. 382-386. DOI: [10.1016/j.scriptamat.2019.12.006](https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2019.12.006)
3. Dudnik E.V. S.N. Lakiza, I.N. Hrechanyuk, A.K. Ruban, V.P. Redko, I.O. Marek, V.B. Shmibelsky, A.A. Makudera, N.I. Hrechanyuk. Thermal barrier coatings based on ZrO_2 solid solutions. *Powder Metall. Met. Ceram.* 2020. Vol. 59, No. 3-4. P. 179-200. DOI: [10.1007/s11106-020-00151-8](https://doi.org/10.1007/s11106-020-00151-8)

Макудера Аліна Олександрівна

молодший науковий співробітник,
Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, Київ,
E-mail: alina.makudera@gmail.com

Лакіза Сергій Миколайович

доктор хімічних наук, провідний науковий співробітник,
Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, Київ,
E-mail: sergij_lakiza@ukr.net

Дуднік Олена Вікторівна

доктор хімічних наук, завідувач відділом,
Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, Київ,
E-mail: dudnikelena@ukr.net

Гречанюк Микола Іванович

доктор технічних наук, провідний науковий співробітник,
Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, Київ,
E-mail: vin25ebt@ukr.net

Features of the formation of a solid solution based on ZrO₂ in the presence of a complex stabilizer

Abstract

The aim of the work is to investigate the possibility of using complex-composite ceramics based on ZrO₂ complex doped with a mixture of REE oxides of the yttrium subgroup for TBP.

Powders of the composition (weight %): 70 M-ZrO₂ + 30 VK were selected for the study. VC is a mixture of REE oxides of the yttrium subgroup, composition (wt.%): 13,3 Y₂O₃, 1,22 Tb₄O₇; 33,2 Dy₂O₃; 8,9 Ho₂O₃; 21,8 Er₂O₃; 1,86 Tm₂O₃; 12,5 Yb₂O₃; 0,57 Lu₂O₃; the total content of other oxides is 6.65 (including 3.2 Al₂O₃).

Modern research on the creation of new materials for the ceramic layer of TBP is related to the use of nanocrystalline powders based on ZrO₂. In them, the formation of a tetragonal solid solution based on ZrO₂ takes place in the range of 700-850 °C. To determine the influence of the dispersion of the original ZrO₂ powder on the phase transformations of the mixture of the composition (weight %): 70 M-ZrO₂ + 30 VK in the process of heat treatment at 800 °C, two M-ZrO₂ powders were used: nanocrystalline hydrothermal powder and fine-grained powder produced by industry. The mixtures were prepared by the ceramic method and fired at 800 °C for 2-18 hours. Sampling was carried out every 2 hours. X-ray phase and microstructural analysis methods were used to study the properties of mixtures. It was determined that the formation of T-ZrO₂ begins after exposure for 14 hours. The morphology of the powders changes topologically continuously, the heat treatment process is accompanied by sintering of the powders.

The obtained results will be used in the creation of a ceramic layer of TBP applied by the method of electron-beam evaporation-condensation (atomic-molecular vapor deposition in a vacuum (EB-PVD))

Keywords: thermal barrier coatings, medium-entropy oxide ceramics, zirconium dioxide, oxides of rare earth elements, doping with oxides of the yttrium subgroup, complex doping of ZrO₂.

Makudera Alina Oleksandrivna

junior researcher,

Francevich Institute for Problems of Materials Science National Academy of Science of Ukraine, Kiev,

E-mail: alina.makudera@gmail.com

Lakiza Sergij Mikolaevih

doctor of Chemical Sciences, leading researcher,

Francevich Institute for Problems of Materials Science National Academy of Science of Ukraine, Kiev,

E-mail: sergij_lakiza@ukr.net

Dudnik Elena Victorovna

doctor of Chemical Sciences, head of the department,

Francevich Institute for Problems of Materials Science National Academy of Science of Ukraine, Kiev,

E-mail: dudnikelena@ukr.net

Hrechanyuk Nikolay Ivanovych

doctor of Engineering, leading researcher,

Francevich Institute for Problems of Materials Science National Academy of Science of Ukraine, Kiev,