

УДК 666.3-16

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ МІЦНІСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ЕЛЕКТРОКОНСОЛІДОВАНИХ МАТЕРІАЛІВ У СИСТЕМІ $ZrO_2-Al_2O_3$**

Д-р техн. наук Е.С. Геворкян, канд. техн. наук Г.А. Петасюк, асп. О.М. Мельник

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ЭЛЕКТРОКОНСОЛИДИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ В СИСТЕМЕ $ZrO_2-Al_2O_3$**

Д-р техн. наук Э.С. Геворкян, канд. техн. наук Г.А. Петасюк, асп. О.М. Мельник

**MATHEMATICAL MODELLING OF STRENGTH CHARACTERISTICS OF
ELECTROCONSOLIDATED $ZrO_2-Al_2O_3$ MATERIALS**

Doctor of Eng. Science E. Gevorkyan, cand. of Eng. Science G. Petasyuk, Ph.D. student O. Melnik

У статті розглядається спосіб прогнозування міцнісних показників (твердість, трищинотійкість) електроконсолідованих матеріалів наносистеми $ZrO_2 - Al_2O_3$ методом математичного моделювання. Виявлено основні закономірності впливу технологічних факторів електроконсолідації і концентрації вихідних компонентів при синтезі матеріалів з використанням у

складі нанопорошків оксидів цирконію та алюмінію на показники міцності отриманих матеріалів, побудовані математичні моделі.

Ключові слова: композиційний матеріал на основі діоксиду цирконію, нанопорошки, електроконсолідація, твердість, тріщиностійкість, математична модель.

В статье рассматривается способ прогнозирования прочностных показателей (твёрдость, трещиностойкость) электроконсолидированных материалов наносистемы $ZrO_2 - Al_2O_3$ методом математического моделирования. Выявлены основные закономерности влияния технологических факторов электроконсолидации и концентрации исходных компонентов при синтезе материалов с использованием в составе нанопорошков оксидов циркония и алюминия на прочностные показатели полученных материалов, построены математические модели.

Ключевые слова: композиционный материал на основе диоксида циркония, нанопорошки, электроконсолидация, твёрдость, трещиностойкость, математическая модель.

In this article the way of forecasting of quality indicators (fracture toughness, hardness) of electroconsolidated materials of $ZrO_2 - Al_2O_3$ nanosystem is considered by a method of mathematical modeling.

The main patterns of influence of technological factors electroconsolidation and concentration of initial components for the synthesis of materials using zirconia and alumina nanopowders on the strength characteristics of the materials were identified. The mathematical models were built. The model is easy to assess the extent and impact of the results of each of the factors (temperature, holding time and Al_2O_3 concentration) on the characteristics of the object, find it optimal regimes operation. The active experiment allows putting the artificial indignation on object under study and measuring the corresponding values output parameters. The size and mix of revolting influences introduced into the facility in accordance with a definite plan, for any optimal criteria.

Keywords: composite material based on zirconia nanopowders, electroconsolidation, hardness, fracture toughness, mathematical model.

Постановка проблеми. Вирішенню задачі синтезу нового матеріалу інструментального призначення сприяє вивчення закономірностей формування його структури і властивостей залежно від складу вихідної шихти і параметрів гарячого пресування, а також встановлення умов формування щільних матеріалів та можливості отримання максимальних значень твердості, міцності і тріщиностійкості.

У зв'язку з тим, що гаряче пресування з прямим пропусканням високоамперного струму (електроконсолідація) характеризується складністю устаткування і відносно низькою (порівняно, наприклад, з вільним спіканням [1, 2]) продуктивністю, то проведення досліджень має передбачати мінімізацію кількості експериментів, спрямованих на вивчення закономірностей структуроутворення і механічних властивостей матеріалу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Існує велика кількість експериментальних даних, що показують позитивний вплив малих добавок Al_2O_3 на механічну стійкість діоксид цирконієвої

кераміки [3, 4]. Це пояснюється тим, що системам з двох не взаємодіючих твердих фаз, рівномірно розподілених в об'ємі, характерні підвищена пластичність і ударна в'язкість. Цей факт відноситься і до системи $Al_2O_3 - ZrO_2$, в якій ступінь взаємодії між компонентами мала, що відповідно забезпечує підвищену стабільність зернограничної структури [5]. Внаслідок цього бінарна система $ZrO_2 - Al_2O_3$ є однією з перспективних композиційних керамік з високими механічними властивостями.

Оскільки одним із важливих питань отримання матеріалів з тонкою структурою є зниження температури компактування, то в цьому питанні також актуальними виявляються добавки Al_2O_3 до ZrO_2 , що дозволяє знизити температуру спікання кераміки тетрагонального YSZ [6].

Аналіз результатів робіт [4, 7, 8], присвячених різним способам отримання субмікронних і нанорозмірних композитів на основі нанопорошків оксидів цирконію та алюмінію, показав різний ступінь взаємного впливу ZrO_2 і Al_2O_3 на мікроструктуру та

характеристики міцності матеріалу залежно від способу їх консолідації.

Постановка задачі. Метою роботи є отримання емпіричних моделей, що характеризують залежності твердості за Віккерсом (HV10) і коефіцієнта тріщиностійкості (K_{1C}), які для кераміки інструментального призначення є найбільш об'єктивними характеристиками потенційної працездатності керамічного інструменту.

Основна частина дослідження. У роботі використовували нанопорошки ZrO_2 , частково стабілізованого 3 мол. % Y_2O_3 з розміром зерен 10 нм, виробництва ЦККіП (Росія), і α - Al_2O_3 з розміром зерен 40 нм, виробництва компанії NANOЕ (Франція).

За допомогою установки гарячого пресування з прямим пропусканням високоамперного струму [9] проводили спікання нанопорошкових сумішей при тиску 30 МПа і витримці при різних температурах.

Визначення мікротвердості і тріщиностійкості проводили виміром діагоналі відбитка і довжини радіальних тріщин, отриманих при вдавлюванні алмазним індентором (пірамідка Віккерса) за допомогою автоматичного мікротвердоміра AFFRI DM8.

Для вирішення поставлених завдань використовувався метод математичного моделювання. Для отримання математичного опису впливу складу вихідної шихти і основних технологічних параметрів процесу електроконсолідації та забезпечення достовірного математичного опису об'єкта найбільш ефективним є багатофакторний експеримент. Результати кодування і вибору інтервалів їх варіювання подано в табл. 1.

Матриця планування трифакторного експерименту з результатами проведених дослідів матиме вигляд, поданий у табл. 2.

Таблиця 1

Рівні та інтервали варіювання факторів експерименту

Фактори	Кодове позначення	Інтервал варіювання	Натуральні рівні факторів, що відповідають кодованим		
			-1	0	+1
Концентрація Al_2O_3 у вихідній суміші, % за масою	m	10	10	20	30
Температура ізотермічної витримки, °С	T	100	1100	1200	1300
Час ізотермічної витримки, хв	τ	2	2	4	6

Таблиця 2

Матриця планування та результати експериментів

№ з.п.	Незалежні змінні			Залежні змінні	
	m, % за масою	T, °С	τ , хв	HV10, ГПа	K_{1c} , МПа·м ^{1/2}
1	30	1300	6	12,4	3,8
2	10	1300	6	9,1	4,5
3	30	1100	6	10,0	5,9
4	10	1100	6	13,3	6,3
5	30	1300	2	13,5	4,8
6	10	1300	2	12,9	5,0
7	30	1100	2	11,8	5,6
8	10	1100	2	14,0	7,0

На основі дослідів, виконаних відповідно до прийнятого плану експерименту, були розраховані коефіцієнти емпіричних рівнянь (за методикою [10]), що мають вигляд залежності цільових функцій від заданих факторів.

З урахуванням впливу вищезгаданих показників була отримана модель, що характеризує залежність твердості за Віккерсом, яка матиме вигляд:

$$HV = 10 \sqrt{114,51 - \frac{103,69}{\sqrt{m}} - 38,243 \lg(\tilde{T}) + 0,08901 \tau^2 - \frac{97,291}{\lg(\tilde{T}/m)} + 0,31668 \sqrt{\tilde{T}/\tau}}, \quad (1)$$

де HV – твердість за Віккерсом (HV10, ГПа);
 m – концентрація оксиду алюмінію у вихідній суміші (% за масою);
 T – температура електроконсолідації (°C);
 τ – час ізотермічної витримки (хв);

$\tilde{T} = T/100$ – масштабоване значення фактора T (застосовується для підвищення стійкості обчислювального процесу).

Емпірична модель, що характеризує залежність коефіцієнта тріщиностійкості від розглянутих факторів, має вигляд:

$$K_{Ic} = 2,3355 - 0,9432 \lg(m) + \frac{471,58}{T^3} + \frac{3,15}{\tau^2}, \quad (2)$$

де K_{Ic} – коефіцієнт тріщиностійкості (МПа·м^{1/2}); m – концентрація оксиду алюмінію у вихідній суміші (% за масою); T – температура електроконсолідації (°C); τ – час ізотермічної витримки (хв).

На рис. 1 і 2 подані поверхні відгуку, що дають графічне відображення даних, отриманих у результаті апроксимації результатів проведених досліджень. Поверхні відгуку побудовані при фіксованому значенні третього фактора $\tau=2$ хв.

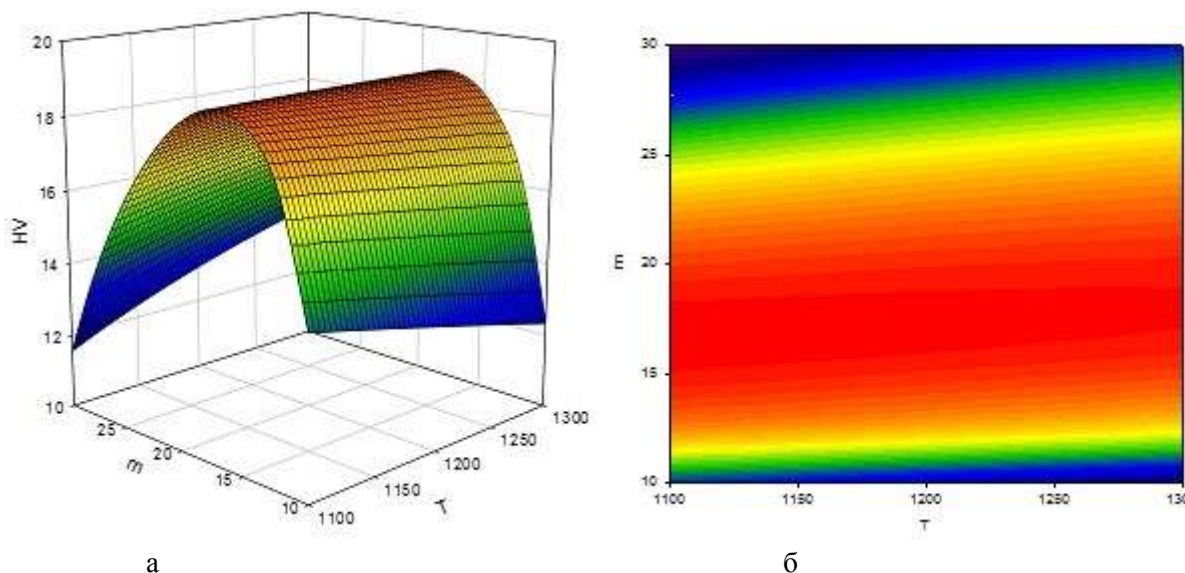


Рис. 1. Залежність HV10 (ГПа) від температури витримки T (°C) та концентрації оксиду алюмінію m (% за масою) у складі вихідної шихти електроконсолідованих матеріалів, отриманих у системі $ZrO_2 - Al_2O_3$: а – поверхня відгуку; б – проекція поверхні відгуку

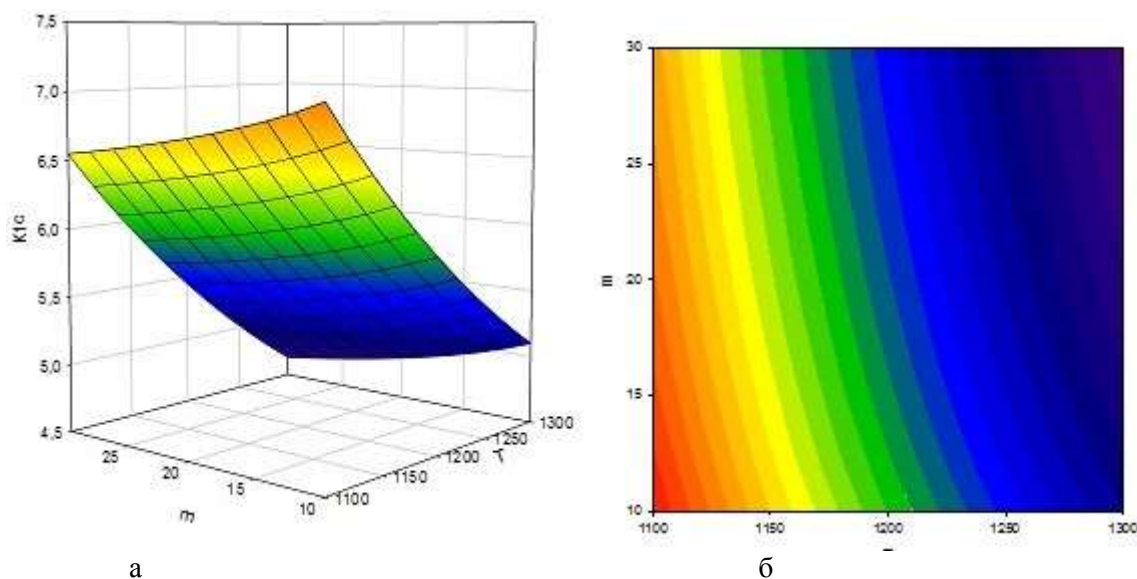


Рис. 2. Залежність K_{1c} ($\text{МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$) від температури витримки T ($^{\circ}\text{C}$) та концентрації оксиду алюмінію m (% за масою) у складі вихідної шихти електроконсолідованих матеріалів, отриманих у системі $\text{ZrO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$: а – поверхня відгуку; б – проекція поверхні відгуку

У рамках зазначених інтервалів значень факторів отримані залежності можна використовувати як інтерполяційні формули для визначення величин твердості за Віккерсом і показників тріщиностійкості. При електроконсолідації матеріалу системи $\text{ZrO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ дані моделі можуть бути застосовані для встановлення раціональних сполучень значень зазначених фізико-механічних показників.

Висновки. У результаті експериментального дослідження процесів за допомогою класичного методу планування експерименту та з використанням оригінальних методичних засобів обробки експериментальних даних отримані емпіричні математичні моделі основних характеристик міцності: твердості і коефіцієнта тріщиностійкості.

Список використаних джерел

1. Штат, В. Порошковая металлургия. Спеченные композиционные материалы [Текст] / В. Штат. – М.: Металлургия, 1983. – 520 с.
2. Скороход, В.В. Порошковые материалы на основе тугоплавких металлов и соединений [Текст] / В.В. Скороход. – К.: Техника, 1982. – 166 с.
3. Colloidal processing and superplastic properties of zirconia and alumina-based nanocomposites [Text] / Y. Sakka, T. Suzuki, K. Morita et al. // Scripta Materials. – 2001. – V. 44. – P. 2075-2078.
4. Preparation and characterization of $\text{ZrO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ particulate nanocomposites produced by plasma technique [Text] / J. Grabis, I. Steins, D. Rasmane et al. // Proceedings of the Estonian Academy of Sciences, Engineering. – 2006. - V. 12, № 4. – P. 349-357.
5. Sarkar, D. Preparation and characterization of an $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ nanocomposite. Part I: Powder synthesis and transformation behavior during fracture [Text] / D. Sarkar, S. Adak, N.K. Mitra // Composites, Part A. – 2007. - V. 38, № 1. – P. 124-131.
6. Vasilkiv, O. Low-Temperature Processing and Mechanical Properties of Zirconia and Zirconia-Alumina Nanoceramics [Text] / O. Vasilkiv, Y. Sakka, V. Skorokhod // Journal of the American Ceramic Society. – 2003. – V. 86, №2. – P. 299-304.
7. Effect of Al_2O_3 addition on ZrO_2 phase composition in the $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{ZrO}_2$ system [Text] / R.P. Pinggen, M. Iwasa, J. Wu et al. // Ceramics International. – 2004. – V. 30. – P. 923-926.

8. Синтез и исследование нанокристаллической керамики в системе $ZrO_2 - CeO_2 - Al_2O_3$ [Текст] / Т.И. Панова, М.Ю. Арсентьев, Л.В. Морозова, И.А. Дроздова // Физика и химия стекла. – 2010. - Т. 36, № 4. – С. 585-595.

9. Пристрій для гарячого пресування порошків шляхом прямого пропускання електричного струму [Текст]: пат.72841 Україна, МПК (2012.01)B22F 3/00 / Азеренков М.О., Геворкян Е.С., Литовченко С.В., Чишкала В.О., Тимофеева Л.А., Мельник О.М., Гуцаленко Ю.Г.; заявник і патентовласник Геворкян Е.С. - № у 2012 03 031; заявл. 15.03.12; опубл. 27.08.12, Бюл. №16.

10. Петасюк, Г.А. Компьютерно-программная система многовариантного построения и анализа эмпирических математических моделей LgArgox для применения в научно-прикладных задачах материаловедения [Текст] / Г.А. Петасюк, О.У. Петасюк // Порошковая металлургия: Республиканский межведомственный сборник научных трудов. – 2008.– № 31. – С. 58-63.

Геворкян Едвін Спартаківич, д-р техн. наук, професор кафедри матеріалів та технологій виготовлення виробів транспортного призначення Української державної академії залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-49. E-mail: edwin_gevorkyan@mail333.com.

Петасюк Григорій Андрійович, старший науковий співробітник лабораторії досліджень поверхневих явищ і синтезу наноструктурованих матеріалів Інституту надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАНУ. Тел.: (044) 430-35-06. E-mail: petasyuk@ukr.net.

Мельник Ольга Михайлівна, аспірант кафедри матеріалів та технологій виготовлення виробів транспортного призначення Української державної академії залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-49. E-mail: melnik_om@mail.ua.

Gevorkyan Edwin, professor of the department of materials and manufacturing technology products transport purposes Ukrainian State Academy of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-49. E-mail: edwin_gevorkyan@mail333.com.

Petasyuk Grigoriy, senior science master of laboratory «*Studies of surface phenomena and synthesis of nanostructured materials*» V. Bakul Institute for Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine. Tel.: (044) 430-35-06. E-mail: petasyuk@ukr.net.

Melnik Olga, Ph.D. student of the department of materials and manufacturing technology products transport purposes Ukrainian State Academy of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-49. E-mail: melnik_om@mail.ua.