

формированием двойников. Из этого можно предположить, что в данном случае преобладает дислокационный механизм упрочнения за счет возрастания общей плотности дислокаций в пересекающихся плоскостях скольжения, а не путем образования мартенсита или карбидов.

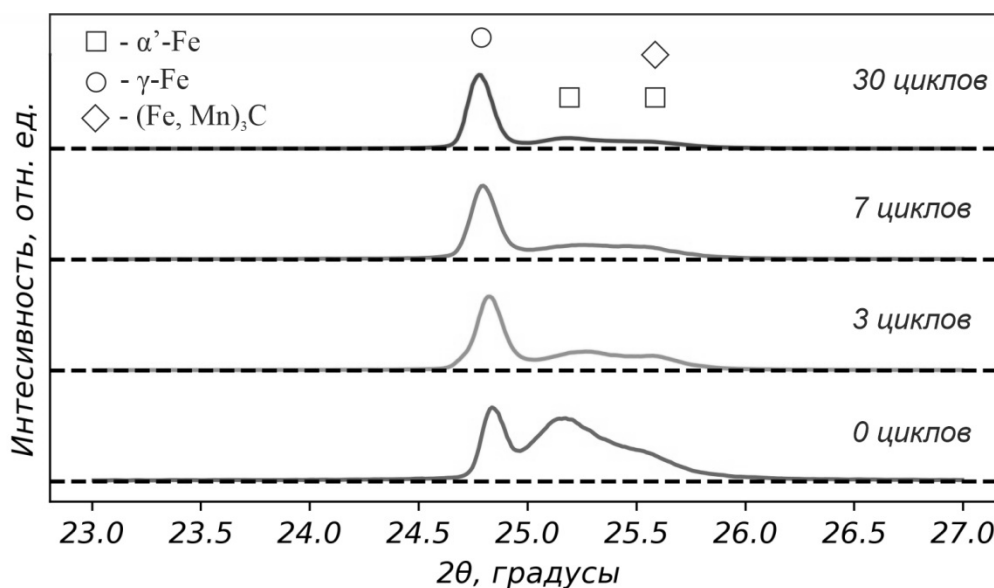


Рисунок 2 – Дифракционные картины стали 110Г13Л на различных этапах трения

#### Благодарность

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Новосибирской области в рамках научного проекта № 19-48-543022.

#### Список литературы

1. Bouaziz O. и др. High Manganese Austenitic Twinning Induced Plasticity Steels: A Review of the Microstructure Properties Relationships // *Curr. Opin. Solid State Mater. Sci.* 2011. Vol. 15. Pp. 141–168.
2. Burov V., Bataev I., Smirnov A. In-situ study of structural evolution of tribological materials using synchrotron radiation // *MATEC Web Conf.* 2017. Vol. 129. Pp. 2024.
3. Lychagin D. и др. Dry sliding of Hadfield steel single crystal oriented to deformation by slip and twinning: Deformation, wear, and acoustic emission characterization // *Tribol. Int.* 2018. Vol. 119. Pp. 1–18.

### СОСТАВ И ХАРАКТЕРИСТИКИ СПЕЧЕННОЙ КЕРАМИКИ, СОДЕРЖАЩЕЙ НИТРИДЫ ТИТАНА И ЦИРКОНИЯ

*А.О. ЧУДИНОВА, Т.В. КОНОВЧУК, Ю.А. МИРОВОЙ*

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

E-mail: [Chudinova.1509@mail.ru](mailto:Chudinova.1509@mail.ru)

При горении нанопорошка алюминия (НПА) в воздухе происходит химическое связывание азота воздуха с образованием нитрида алюминия AlN [1]. Путем сжигания НПА в постоянном магнитном поле (1500 Э) содержание AlN в конечных продуктах горения повышалось до 83 % [2]. При сгорании смесей НПА с диоксидами титана и циркония в

воздухе в конечных продуктах стабилизируются соответствующие нитриды TiN и ZrN [3, 4]. Из двух серий продуктов сгорания смесей НПА с диоксидами были выбраны составы с максимальным содержанием нитридов (TiN –  $50 \pm 3$  %, ZrN –  $70 \pm 4$  %). Путем сжигания нескольких навесок смесей по 4,8 г наработаны конечные продукты, которые были усреднены и дезагрегированы для использования в качестве шихты для получения спеченной керамики, таблица 1.

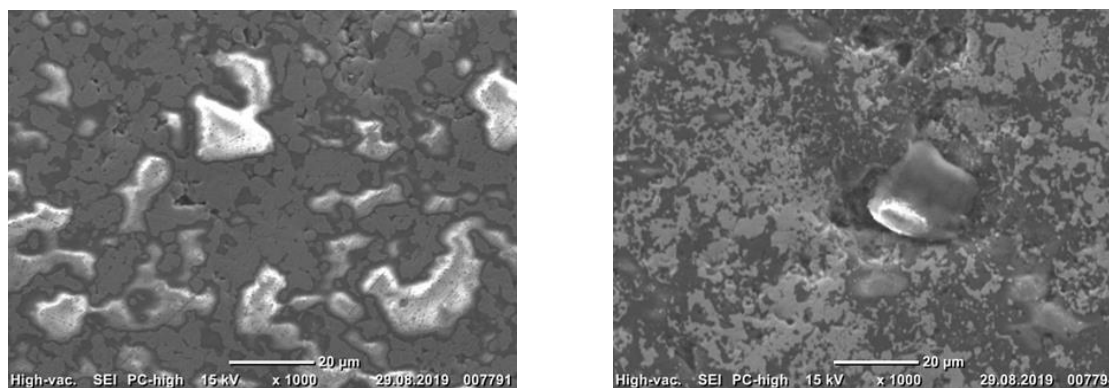
Таблица 1 – Фазовый состав шихты по данным рентгено-фазового анализа (РФА)

Образец	Содержание TiN/ZrN, %	Содержание Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	Содержание TiO <sub>2</sub> /ZrO <sub>2</sub> , %
Ti – 3	$50 \pm 3$	$15 \pm 2$	$27 \pm 3$
Zr – 3	$70 \pm 4$	$8 \pm 2$	$14 \pm 2$

Спекание проводили в графитовой пресс-форме в аргоне при нагревании до 1600 °С и выдерживании образцов при этой температуре в течение 20 мин.

После горячего прессования и полирования с использованием алмазных паст образцы керамики имели желтую окраску, характерную для нитридов титана и циркония.

На рисунке 1 представлены микрофотографии шлифов образцов керамических материалов.



а

б

Рисунок 1 - Микрофотографии шлифов образцов спеченных керамических материалов, полученных из порошков: а) Ti – 3; б) Zr – 3

Согласно электронной микроскопии, в поверхности керамических образцов обнаруживаются открытые поры (темные области). Также на микрофотографиях присутствуют включения белого цвета с повышенной плотностью вещества, наиболее вероятным представляющие собой нитриды титана и циркония.

Спеченные образцы нитридосодержащей керамики также анализировали с помощью РФА. Фазовый состав керамических образцов представлен в таблице 2.

Таблица 2 - Фазовый состав керамических образцов по данным РФА

Образец	Содержание TiN/ZrN, %	Содержание Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	Содержание TiO <sub>2</sub> /ZrO <sub>2</sub> , %
Ti – 3	62,5	37,5	-
Zr – 3	89,0	8,0	3,0

Измерение микротвердости проводили с использованием прибора Nano Indenter G200, который позволяет по диаграмме внедрения автоматически рассчитывать модуль упругости E и микротвердость H в соответствии со стандартом ISO 14577. Результаты измерений приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Характеристики полученных керамических образцов

Образец	Микротвердость Н, МПа	Модуль упругости Е, МПа
Ti – 3	37674	607306
Zr – 3	38254	663669

Согласно полученным результатам, таблица 3, величина модуля упругости и микротвердость обоих образцов позволяет их отнести к сверхтвердым материалам. Повышенная микротвердость в сравнении с микротвердостью исходных компонентов связана с формированием прочных ионно-ковалентных связей в полученных материалах.

#### **Выводы**

1. Продукты сгорания в воздухе смесей нанопорошка алюминия с диоксидами титана и циркония содержат компоненты, необходимые для синтеза нитридсодержащей керамики: нитрид, оксид алюминия и остаточный диоксид. При этом более 95 % частиц продуктов сгорания имеют характерный размер менее 1 мкм.
2. В условиях горячего прессования (1600 °С, 30 МПа) синтезированы сверхтвердые керамические материалы с микротвердостью 37674 МПа (TiN) и 38254 МПа (ZrN), что объясняется формированием прочных ионно-ковалентных связей в материалах.

*Работа выполнена при поддержке Государственного задания «Наука», проект №11.1928.2017/4.6, грант РФФИ № 19-03-00160 а2019.*

#### **Список литературы**

1. Ильин А.П., Проскуровская Л.Т. Двухстадийное горение ультрадисперсного порошка алюминия на воздухе // ФГВ – 1990. – Т.26, №2. С. 71-72.
2. Ильин А.П., Мостовщиков А.В. Кристаллические продукты сгорания в воздухе нанопорошка алюминия при действии магнитного поля // Известия ТПУ. Физика. – 3013. Т.323, №2. – С.101-104.
3. Роот Л.О., Ильин А.П., Коновчук Т.В. К вопросу о механизме синтеза TiN, ZrN и HfN при сжигании смесей нанопорошка алюминия с диоксидами TiO<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub> и HfO<sub>2</sub> // Новые огнеупоры. – 2019. №8. – С.44-48.
4. Амелькович, Ю. А. Синтез нитридов титана и циркония сжиганием в воздухе смесей их оксидов с нанопорошком алюминия / Ю. А. Амелькович, А. П. Астанкова, Л. О. Толбанова, А. П. Ильин // Новые огнеупоры. – 2007. – № 11. – С. 64–67.