

Исследование процесса формования и консолидации заготовок из механосинтезированных порошков гафнатов европия и церия

Ж.В. Еремеева¹ ✉, Е.В. Агеев², Г.Х. Шарипзянова³, Ю.Ю. Капланский¹,
Н.М. Ниткин³, А.С. Ахметов¹, В.Л. Орлов³, А.А. Саенко¹

¹ Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
Ленинский проспект, д. 4, г. Москва 119049, Российская Федерация

² Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

³ Московский политехнический университет
ул. Большая Семёновская, д. 38, г. Москва 107023, Российская Федерация

✉ e-mail: eremeeva-shanna@yandex.ru

Резюме

Цель исследования. Провести исследование процесса формования и консолидации заготовок из механосинтезированных порошков гафнатов европия и церия.

Методы. Был проведен синтез сложных соединений гафната европия Eu_2HfO_5 и гафната церия Ce_2HfO_5 из оксидов европия, гафната и церия при помощи механохимического синтеза в планетарно-центриробежной мельнице. Частота вращения диска составляла 600 – 900 об/мин и частота вращения барабанов 1000 – 1800 об/мин, при соотношении размольных тел к массе порошковой шихты (35 – 45): 1, в атмосфере аргона. Синтез продолжался 5 – 120 мин.

Результаты. Был проведен рентгенофазовый анализ, показавший образование Eu_2HfO_5 и Ce_2HfO_5 ; а также исследование морфологии частиц полученных порошков, их технологических свойств, гранулометрического состава, формуемости и уплотняемости, а также процесса их консолидации.

Заключение. На основании проведенных экспериментальных исследований, направленных на исследование процесса формования и консолидации заготовок из механосинтезированных порошков гафнатов европия и церия, был выявлен оптимальный режим синтеза гафнатов церия и европия. Методом механоактивации были получены порошок гафната церия с размерами частиц 30-100 нм, порошок гафната европия с размерами частиц 40-70 нм. При помощи методов РФА, ПЭМ и СЭМ была изучена смешанная структура полученных механосинтезом порошков гафнатов лантаноидов. Были определены технологические свойства механосинтезированных порошков гафната церия и европия, а так же изучена их уплотняемость и формуемость после прессования и спекания. Образцы из порошка гафната европия имеют относительную плотность больше, чем образцы из порошка гафната церия после консолидации при температурах 900-1200 °С и времени изотермической выдержки от 30 до 120 мин. Исследования микротвердости образцов гафнатов лантаноидов после спекания показали, что образцы гафната европия имеют твердость больше, чем образцы гафната церия.

© Еремеева Ж.В., Агеев Е.В., Шарипзянова Г.Х., Капланский Ю.Ю., Ниткин Н.М., Ахметов А.С., Орлов В.Л., Саенко А.А., 2021

Ключевые слова: сложные оксиды лантаноидов; гафнат европия; гафнат церия; механохимический синтез; оксид гафния; оксид европия; оксид церия; формование; консолидация; физико-химические свойства; структура гафнатов лантаноидов.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Финансирование: Работа проводилась в рамках гранта РФФИ (номер гранта 19-08-00273).

Для цитирования: Исследование процесса формования и консолидации заготовок из механосинтезированных порошков гафнатов европия и церия / Ж.В. Еремеева, Е.В. Агеев, Г.Х. Шарипзянова, Ю.Ю. Капланский, Н.М. Ниткин, А.С. Ахметов, В.Л. Орлов, А.А. Саенко // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021; 25(3): 8-26. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-3-8-26>.

Поступила в редакцию 20.07.2021

Подписана в печать 16.08.2021

Опубликована 21.10.2021

Investigation of Molding Process and Consolidation of Preforms from Mechanically Synthesized Powders of Europium and Cerium Hafnates

Zhanna V. Eremeeva ¹ ✉, Evgeny V. Ageev ², Gyuzel H. Sharipzyanova ³,
Yuriy Yu. Kaplansky ¹, Nikolay M. Nitkin ³, Amangeldy S. Akhmetov ¹,
Vadim L. Orlov ³, Anna A. Saenko ¹

¹ National Research Technological University "MISIS"
4 Leninsky Prospekt, Moscow 119049, Russian Federation

² Southwest State University
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

³ Moscow Polytechnic University
38 Bolshaya Semenovskaya str., Moscow 107023, Russian Federation

✉ e-mail: eremeeva-shanna@yandex.ru

Abstract

Purpose of research. To study the process of molding and consolidation of preforms from mechanically synthesized powders of europium and cerium hafnates.

Methods. Complex compounds of europium hafnate Eu_2HfO_5 and cerium hafnate Ce_2HfO_5 have been synthesized from europium, hafnate and cerium oxides using mechanochemical synthesis in a planetary centrifugal mill. The rotational speed of the disk was 600 - 900 rpm and the rotational speed of the drums is 1000 - 1800 rpm, with the ratio of grinding bodies to the mass of the powder charge (35 - 45): 1, in an argon atmosphere. Synthesis lasts 5 - 120 minutes.

Results. An X-ray phase analysis has been performed showing the formation of Eu_2HfO_5 and Ce_2HfO_5 ; as well as the study of the morphology of particles of the obtained powders, their technological properties, granulometric composition, formability and compaction, as well as the process of their consolidation.

Conclusion. On the basis of the experimental studies aimed at studying the molding process and consolidation of preforms from mechanically synthesized powders of europium and cerium hafnates, it has been revealed the optimal mode of synthesis of cerium and europium hafnates. We have obtained a cerium hafnate powder with a particle size of 30-100 nm and a europium hafnate powder with a particle size of 40-70 nm by the method of mechanical

activation. Using X-ray phase analysis, TEM and SEM methods, the mixed structure of lanthanide hafnates powders obtained by mechanosynthesis have been studied. The technological properties of mechanically synthesized powders of cerium and europium hafnate, as well as, their compaction and formability after pressing and sintering have been determined and studied. Samples from europium hafnate powder have a relative density higher than samples from cerium hafnate powder after consolidation at temperatures of 900-1200 °C and isothermal holding time from 30 to 120 min. A study of the microhardness of lanthanide hafnate samples after sintering has shown that europium hafnate samples have greater hardness than cerium hafnate samples.

Keywords: complex oxides of lanthanides; europium hafnate; cerium hafnate; mechanochemical synthesis; hafnium oxide; europium oxide; cerium oxide; molding; consolidation; physicochemical properties; structure of lanthanide hafnates.

Conflict of interest. The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Funding: The work has been carried out within the framework of the RFBR grant (grant number 19-08-00273).

For citation: Eremeeva Z. V., Ageev E. V., Sharipzyanova G. H., Kaplansky Y. Yu., Nitkin N. M., Akhmetov A. S., Orlov V. L., Saenko A. A. Investigation of Molding Process and Consolidation of Preforms from Mechanically Synthesized Powders of Europium and Cerium Hafnates. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2021; 25(3): 8-26 (In Russ.). [https://doi.org/ 10.21869/2223-1560-2021-25-3-8-26](https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-3-8-26).

Received 20.07.2021

Accepted 16.08.2021

Published 21.10.2021

Введение

Современная химическая промышленность, а также атомная промышленность ставят перед материаловедением задачу по разработке и внедрению новых эффективных материалов, отвечающих современным требованиям данных отраслей. Сложные оксидные соединения гафнатов, цирконатов, гранатов отличаются уникальными химическими свойствами, и имеют повышенные прочностные и эксплуатационные свойства. Гафнаты лантаноидов имеют отличительную особенность по свойствам поглощающих материалов, так как содержат ядра Hf и Dy или Eu или La, которые характеризуются высокими сечениями поглощения [1-3]. Необходимо отметить, что можно, изменяя соотношение содержания гафния, диспрозия, лантана, европия в поглощающем мате-

риале, влиять на физическую эффективность поглощения. В промышленной практике проводят высокотемпературное сплавление их оксидов в вакуумной индукционной печи, затем следует дробление полученного слитка, его измельчение, затем фракционирование, последующее прессование и твердофазное спекание.

В ряде последних, как отечественных, так и зарубежных работ [4-6] дано описание технологий синтеза сложных оксидных соединений методом механохимии с использованием планетарно-центробежных мельниц. Как показано в источниках [7, 8] полученные механохимией порошки сложных оксидных соединений характеризуются высокой дисперсностью, средний размер таких порошков не превышает 200 нм, данные порошки сильно агломерируются и не обладают текучестью. Следует отметить,

что одной из основных задач химии твердого тела стоит решение проблемы интенсификации твердофазного синтеза сложнооксидных соединений. Поэтому в настоящее время идет ускоренное развитие технологий механосинтеза.

Целью настоящей работы являлось проведение исследования процесса формования и консолидации заготовок из механосинтезированных порошков гафнатов европия и церия.

Материалы и методы

Для проведения синтеза сложных оксидных соединений гафната европия Eu_2HfO_5 и гафната церия Ce_2HfO_5 в работе использовались порошки оксида европия, оксида гафния и оксида церия класса ХЧ (химически чистые), которые брались в стехиометрическом соотношении. Порошок оксида европия содержал посторонние примеси не более 0,4 мас.%. Насыпная плотность порошка оксида европия составляет $0,95 \text{ г/см}^3$. Средний размер частиц данного порошка от 1 до 3 мкм, форма порошка оксида европия осколочная, данный порошок не течет. Порошок HfO_2 содержит посторонних примесей не более 0,4 мас.%. Его насыпная плотность – $1,87 \text{ г/см}^3$. Порошок HfO_2 имеет большой разброс по размерам от 200 до 400 мкм. Порошок HfO_2 не течет и имеет пластинчатую форму. Порошок CeO_2 содержит примесей до 0,2 мас.%, форма частиц данного порошка игольчатая, насыпная плотность порошка CeO_2 составляет $0,82 \text{ г/см}^3$, размер частиц от 2 мкм до

5 мкм, порошок CeO_2 агломерирован, он не обладает текучестью.

С целью получения порошков гафната церия и гафната европия в работе проводился механохимический синтез с использованием планетарно-центробежной мельницы ПЦМ «Активатор -2с» производства ООО «Завод Химического Машиностроения». Исходя из проведенных предварительных исследований по параметрам механохимического синтеза в работе были выбраны следующие режимы: частота вращения диска 600-900 об/мин; частота вращения барабанов 1000 ... 1800 об/мин; соотношение массы размольных тел к массе порошковой шихты - (35-45): 1; давление аргона в барабанах составляло 300-500 КПа; продолжительность синтеза 5-120 минут.

После проведения синтезов был проведен рентгенофазовый анализ, который показал 100 % превращение в соединение Eu_2HfO_5 и в соединение Ce_2HfO_5 . Было проведено исследование морфологии полученных порошков и их технологических свойств, также была изучена формуемость и уплотняемость механосинтезированных порошков гафнатов европия и церия, а также проанализирован процесс их консолидации. Уплотняемость порошков определялась согласно ГОСТ 25280-90. Механосинтезированные порошки гафнатов европия и церия формовали на автоматическом гидравлическом прессе Fontijne Grotnes B. V. Lab Econ 600 по двухсторонней схеме приложения нагрузки. Диаметр матрицы составлял 11 мм, давление от

100 до 600 МПа с шагом в 100-200 МПа, масса навески составляла 0,5 г.

Твердофазное спекание полученных формовок из механосинтезированных порошков гафнатов европия и церия осуществляли в муфельной электропечи марки СШОЛ 1.1,6/12-МЗ (Россия) при выдержках в течение 30, 60 и 120 мин, при температурах 900, 1000, 1100 и 1200°C. Охлаждение консолидированных образцов проводили с печью.

Плотность рассчитывали исходя из фактических геометрических размеров формовок, их массы и аддитивной плотности порошков. Общую пористость определяли по ГОСТ 18898 – 89¹. Твердость определяли по методу Роквелла согласно ГОСТ 9013 – 59².

На универсальном лазерном приборе измерения размера частиц модели FRITSCH ANALYSETTE 22 MicroTec-plus (Германия) был осуществлен контроль гранулометрического состава механосинтезированных порошков гафнатов европия и церия. Структуру и свойства механосинтезированных порошков гафнатов европия и церия и спеченных заготовок из данных порошков изучался на сканирующем электронном микроскопе S – 3400N, Рентгенофазовый анализ проводили на оборудовании ДРОН – 2. Просвечивающую электронную микро-

скопию делали на многоцелевом аналитическом электронном микроскопе JEM-2300.

Результаты и их обсуждение

В предварительно проведенных исследованиях был установлен наиболее рациональный режим механохимического синтеза гафнатов лантаноидов: частота вращения водила и барабанов – 800 и 1200 об/мин, соответственно; соотношение масс размольных тел и обрабатываемого порошка – 40: 1, продолжительность обработки – 30-60 мин.

После проведения механосинтеза был исследован гранулометрический состав полученных порошков гафната европия и гафната церия. Данные результаты представлены на рис. 1.

С помощью электронного микроскопа была изучена их морфология. Изображения частиц порошков гафната европия и гафната церия представлены на рис. 2.

По результатам данных исследований выявлено, что механосинтезированный порошок гафната европия представляет собой нанокристаллические частицы неравноосной формы размерами 40-70 нм, объединенные в агломераты 300-400 нм.

Соответственно у механосинтезированного порошка гафната церия средний размер частиц составляет 30-100 нм, Порошок также агломерируется, размер агломератов колеблется от 200 до 400 нм.

¹ ГОСТ 18898 – 89. Изделия порошковые. Методы определения плотности содержания масла и пористости. Введ. 1989.20.12. М., 1989. 10 с.

² ГОСТ 9013 – 59. Металлы. Метод измерения твердости по Роквеллу. Введ. 1959.04.02. М., 1959. 6 с.

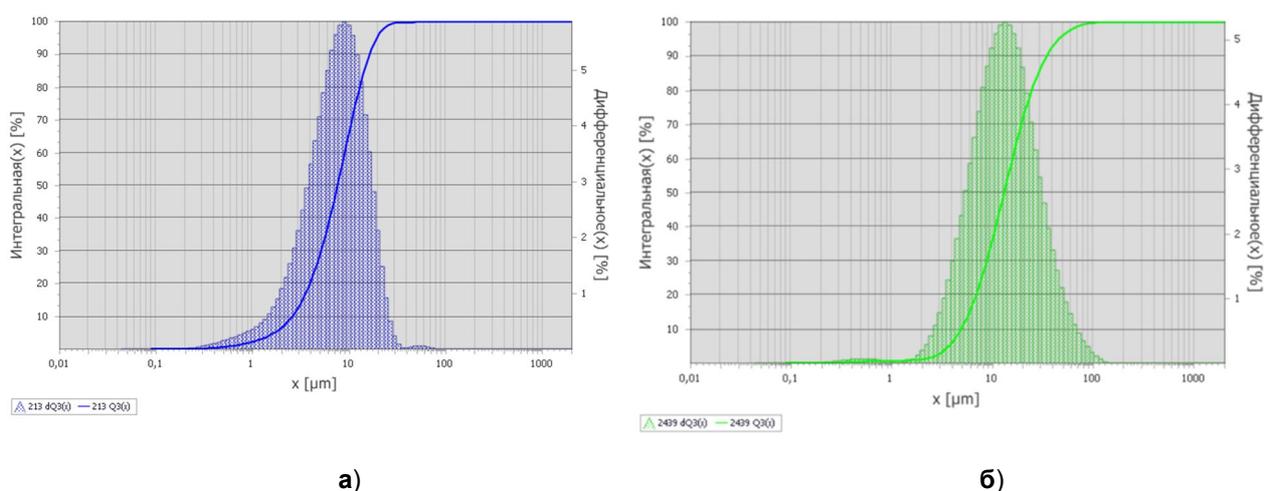


Рис. 1. Гистограммы распределения по размерам частиц порошков: **а** – гафната европия; **б** – гафната лантана, полученных механосинтезом смесей оксидов европия и гафния и смесей оксидов лантана и гафния соответственно

Fig. 1. Histograms of the particle size distribution of powders: **a** – europium garnet; **b** – lanthanum hafnate obtained by mechano-synthesis of mixtures of europium and hafnium oxides and mixtures of lanthanum and hafnium oxides, respectively

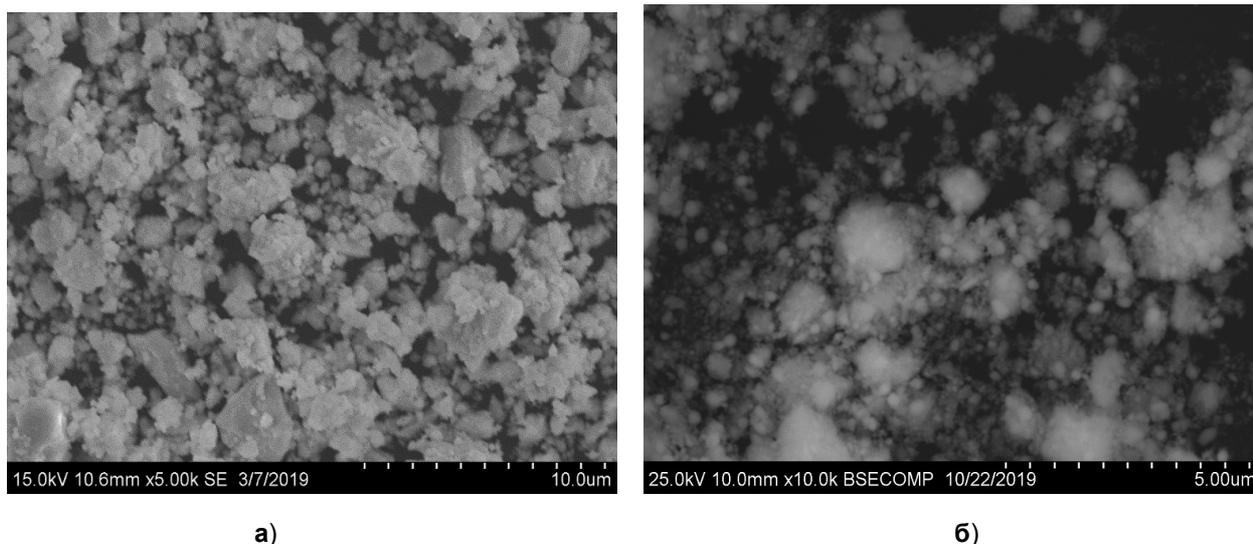


Рис. 2. СЭМ-изображение порошка гафната: **а** – европия; **б** – церия

Fig. 2. SEM image of hafnate powder: **a** – europium; **b** – cerium

Такое различие в размерах получаемых порошков можно объяснить тем, что исходные порошки для синтеза гафната европия имели размеры частиц меньше, чем исходные порошки для механосинтеза гафната церия.

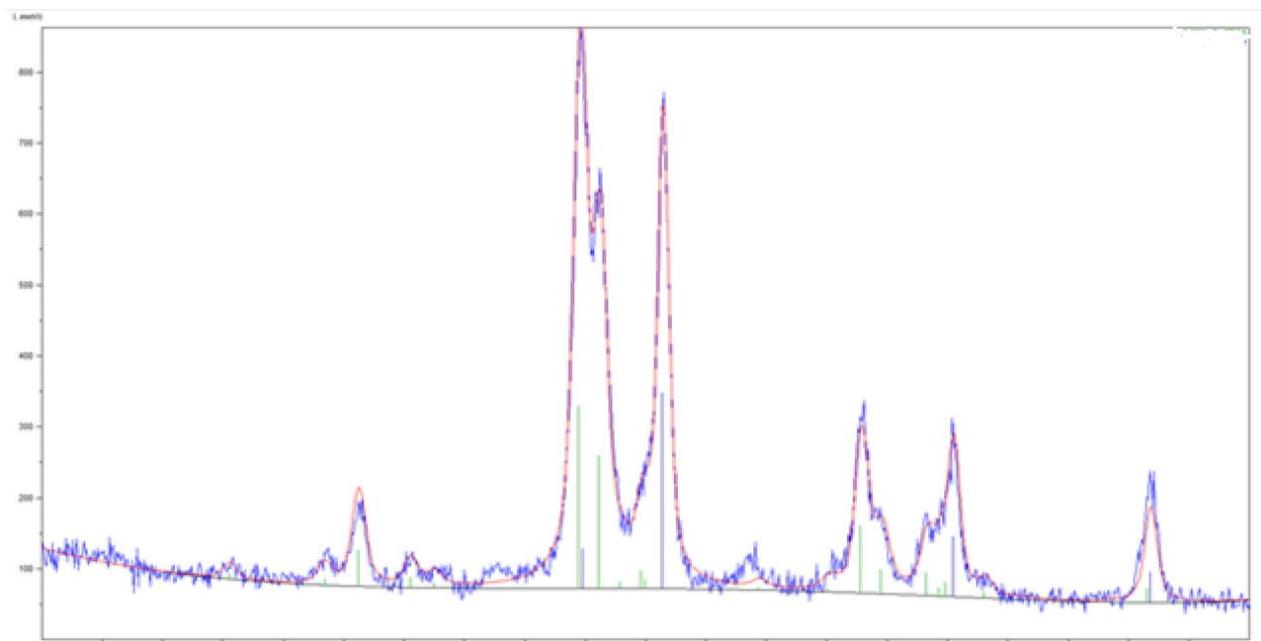
В работе были определены технологические свойства механосинтезированных порошков гафната церия и гафната европия, которые представлены в табл. 1.

Таблица 1. Свойства порошков гафната европия и гафната церия полученных механосинтезом**Table 1.** Properties of europium hafnate and cerium hafnate powders obtained by mechano-synthesis

Материал / Material	Текучесть, с / Fluidity, seconds	Насыпная плотность, г/см ³ / Bulk density, g/cm ³	Удельная по- верхность, м ² /г / Specific surface area, m ² /g	Ср. размер агломератов, нм / Average size of agglome- rates, nm	Размер частиц, нм / Particle size, nm
Eu ₂ HfO ₅ механосинтез	не течет	1,75 ... 1,77	18 ... 26	300 ... 400	40 ... 70
Ce ₂ HfO ₅ механосинтез	не течет	1,80 ... 1,85	15 ... 23	200 ... 400	30 ... 100

Данные с рентгенофазового анализа показали, что полное превращение исходных оксидов лантаноидов в нанокристаллический сложный оксид происходит при механохимическом синтезе свыше 30 минут (рис. 3 и 4). При меха-

ноактивации гафната европия и гафната церия в течение меньшего времени наблюдается непрореагировавшие либо оксид европия, либо оксид церия соответственно.

**Рис. 3.** Рентгенофазовый анализ смеси CeO₂-HfO₂ после МХО при продолжительности обработки 30 мин**Fig. 3.** X-ray phase analysis of the CeO₂-HfO₂ mixture after MCO at the treatment duration 30 min

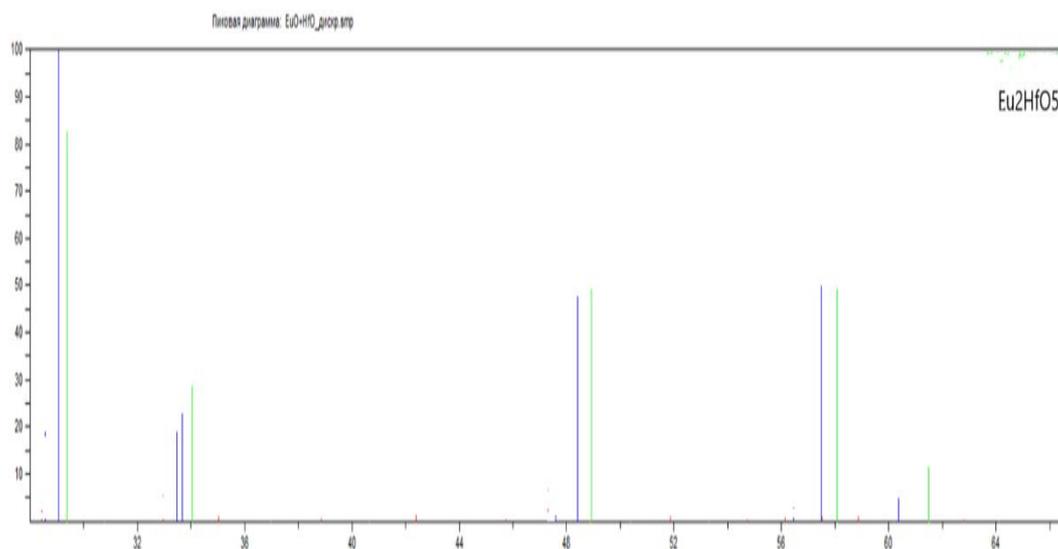


Рис. 4. Рентгенофазовый анализ смеси $\text{Eu}_2\text{O}_3\text{-HfO}_2$ после МХО при продолжительности обработки 40 мин

Fig. 4. X-ray phase analysis of the $\text{Eu}_2\text{O}_3\text{-HfO}_2$ mixture after MCO at a treatment duration of 40 min

Данные исследования энергодисперсионного анализа элементного состава для отдельной частицы гафната церия и гафната европия представлены на рис. 5 и показывают, что элементы содержатся

практически в стехиометрическом соотношении по всему объему частицы после механохимической обработки в течение 30 минут [7].

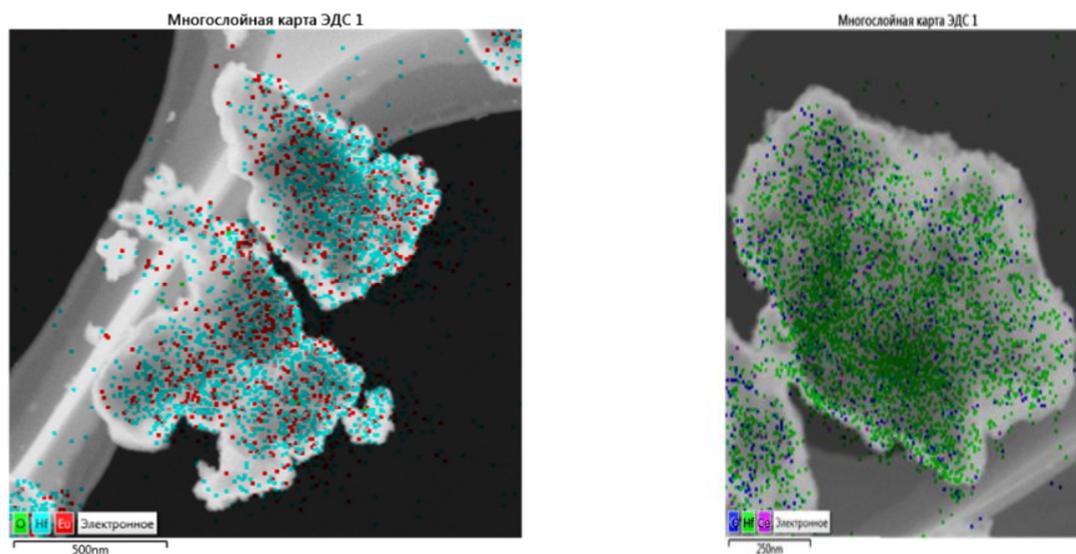


Рис. 5. ПЭМ–изображение частицы порошков Eu_2HfO_5 и Ce_2HfO_5 , соответственно после МХО при продолжительности обработки 30 мин

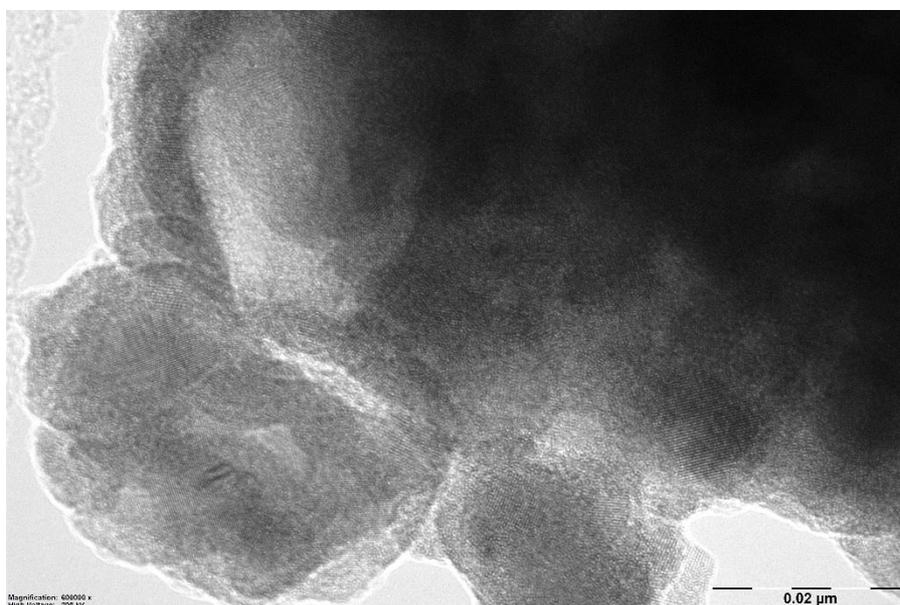
Fig. 5. TEM-image of a particle of Eu_2HfO_5 and Ce_2HfO_5 powders, respectively, after MHO at a processing time of 30 min

Исследования механосинтезированных порошков гафната европия и гафната церия с применением метода ПЭМ выявили смешанную структуру: типичную полосчатую структуру из атомных

плоскостей, которая характерна для кристаллического состояния, и структуру с разупорядоченным состоянием атомов, близкую к аморфной (рис. 6) [8].



а)



б)

Рис. 6. ПЭМ-изображение: **а** – частицы Eu_2HfO_5 , полученной механохимическим способом; **б** – агломерата частиц гафната церия, полученного механосинтезом

Fig. 6. TEM image: **a** – Eu_2HfO_5 particles obtained by mechanochemical method; **b** – agglomerate of cerium hafnate particles obtained by mechanosynthesis

Была изучена уплотняемость механосинтезированных порошков гафнатов европия и гафната церия, после формования были определены их размеры, вес,

плотность, относительная плотность и построены зависимости относительной плотности от давления прессования, которые представлены на рис. 7.

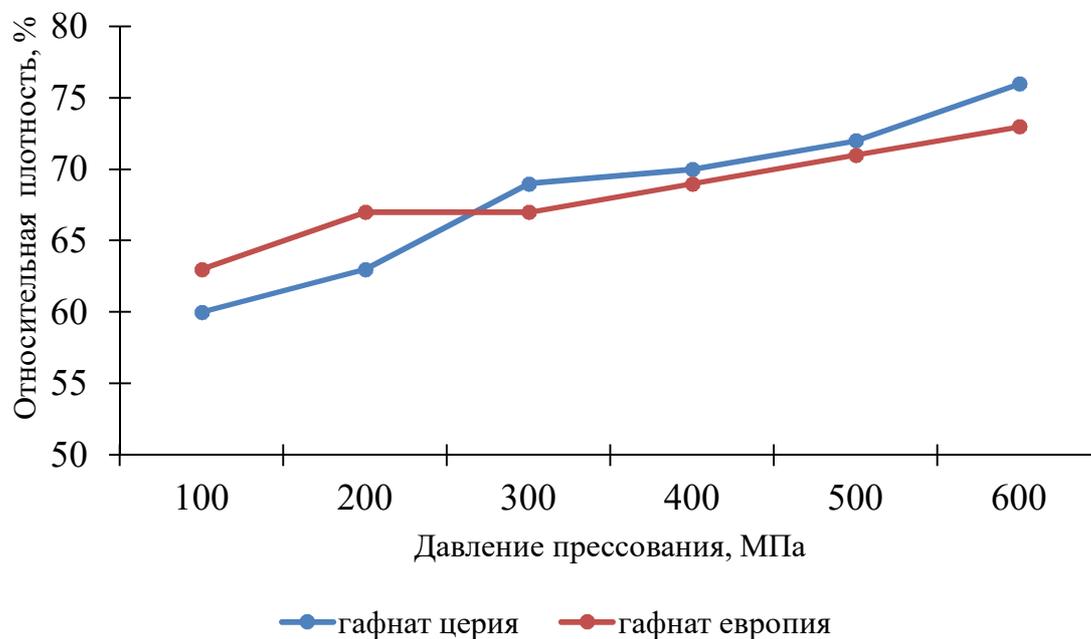


Рис. 7. Зависимость относительной плотности гафнатов европия и церия от давления прессования

Fig. 7. Dependence on the density of europium and cerium hafnates on the pressing pressure

Из представленных на рис. 7 зависимостей относительной плотности следует, что гафнат европия и гафнат церия хорошо уплотняются во всем рассматриваемом диапазоне давлений 200-600 МПа. Оба сложных оксида лантаноида имеют хорошую формуемость, так как даже при малых давлениях от 10 до 50 МПа, они сохраняют форму без осыпания кромок и не разрушаются.

Были проведены исследования по изучению процесса консолидации формовок из порошков гафнатов европия и церия. На рис. 8 представлена зависимость относительной плотности образцов гафнатов церия и европия от давления

формования, спекание данных образцов проводили при температуре 1200 °С в течение 60 минут. Как следует из представленных на рис. 8 зависимостей, наибольшей относительной плотностью 86 % обладают образцы из гафната европия, сформованные при давлении 600 МПа, когда как образцы из гафната лантана имеют относительную плотность после спекания 70 % при давлении формования 600 МПа. Образцы гафната церия, которые были сформованы при аналогичном давлении, имеют относительную плотность 72 %, что говорит об активизации процесса массопереноса при спекании образцов гаф-

ната европия [9], которые связаны с формой и размером частиц данного порошка. Было изучено влияние продолжительности процесса консолидации на относительную плотность образцов при

проведении спекания при температуре 1200 °С, образцы гафната европия и гафната церия были сформованы при давлении 600 МПа. Полученные зависимости представлены на рис. 9.

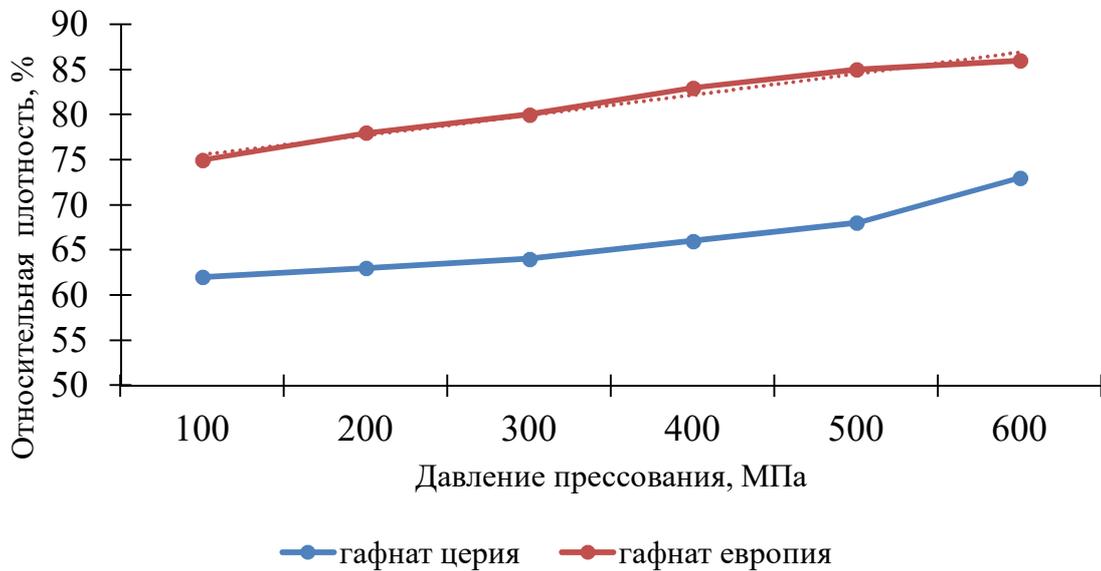


Рис. 8. Зависимость относительной плотности гафнатов европия и церия от давления прессования после спекания

Fig. 8. Dependence on the density of europium and cerium hafnates on the pressing pressure after sintering

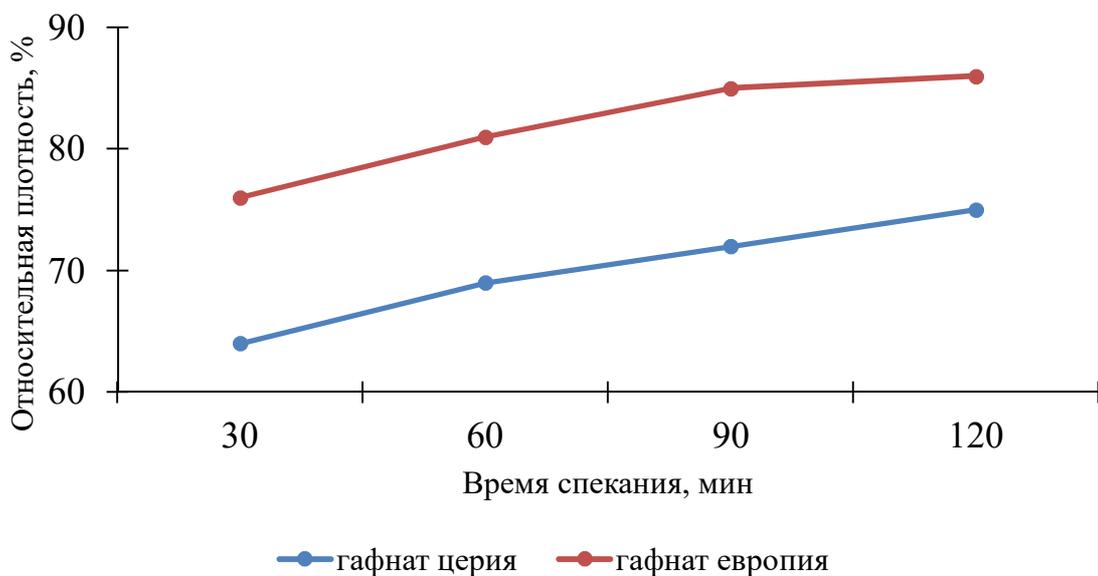


Рис. 9. Зависимость относительной плотности образцов из гафната европия и гафната церия от времени спекания

Fig. 9. Dependence of the relative density of samples from europium hafnate and cerium hafnate on the sintering time

Как следует из зависимостей относительной плотности от времени спекания относительная плотность 85-86% достигается на образцах из гафната европия при спекании в течение 90-120 минут, а относительная плотность 72-75% достигается у образцов из гафната церия при спекании в течение 120 минут. Такая разница в относительной плотности можно объяснить меньшим

размером частиц гафната европия и их большей диффузионной подвижностью.

Было изучено влияние температуры процесса спекания на относительную плотность образцов при проведении процесса консолидации в течение 60 минут, образцы гафната европия и гафната церия были сформованы при давлении 600 МПа. Полученные зависимости представлены на рис. 10.

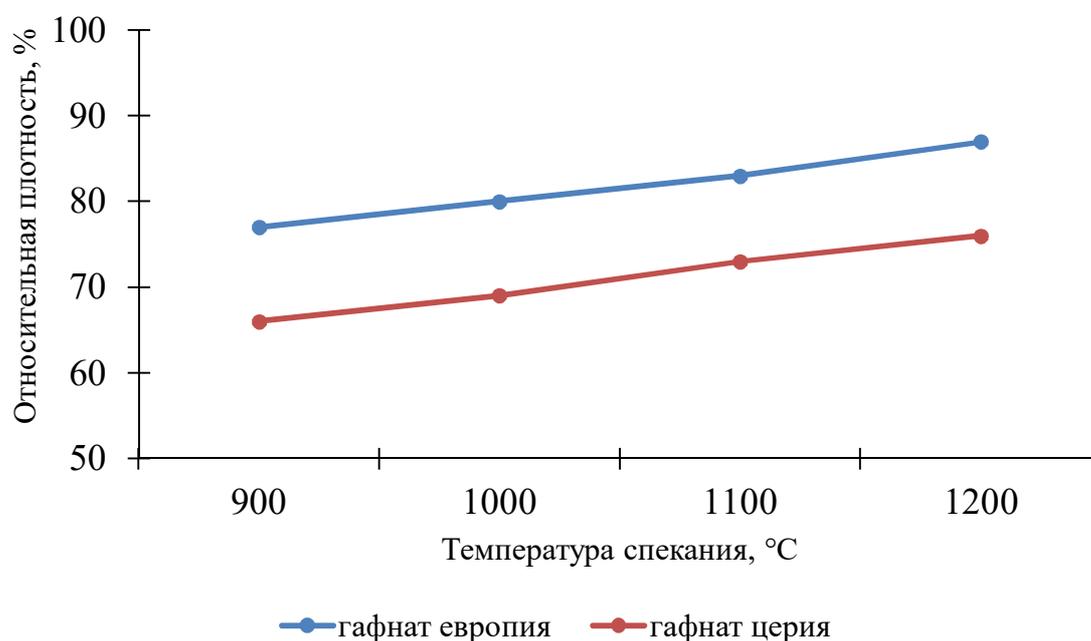


Рис. 10. Зависимость относительной плотности образцов из гафната европия и гафната церия от температуры спекания

Fig. 10. Dependence of the relative density of samples from europium hafnate and cerium hafnate on the sintering temperature

Как следует из зависимостей относительной плотности от температуры спекания относительная плотность 87 % достигается на образцах из гафната европия при температуре спекания 1200 °C, а относительная плотность 75-76 % достигается у образцов из гафната церия при этой же температуре спекания. Такая разница в относительной плотности

большей диффузионной активностью механосинтезированного порошка гафната европия.

После спекания в муфельной печи образцы исследовали при помощи метода СЭМ. Результаты исследования образцов гафната церия представлены на рис. 11, гафната европия – на рис. 12.

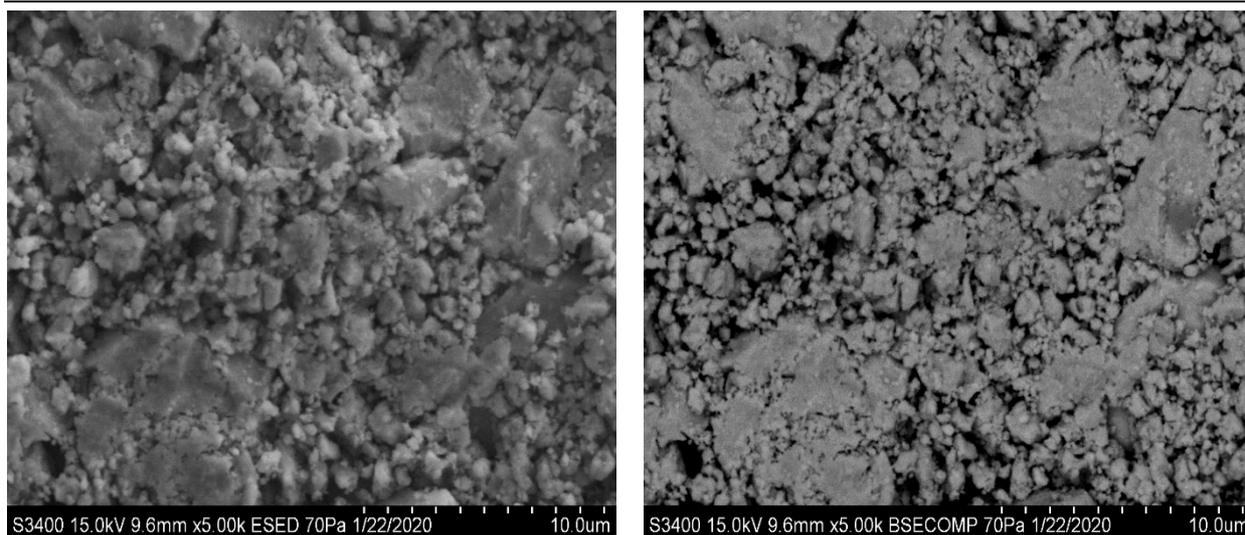


Рис. 11. СЭМ-изображение порошка гафната церия после спекания в муфельной печи

Fig. 11. SEM-image of cerium hafnate powder after sintering in a muffle furnace

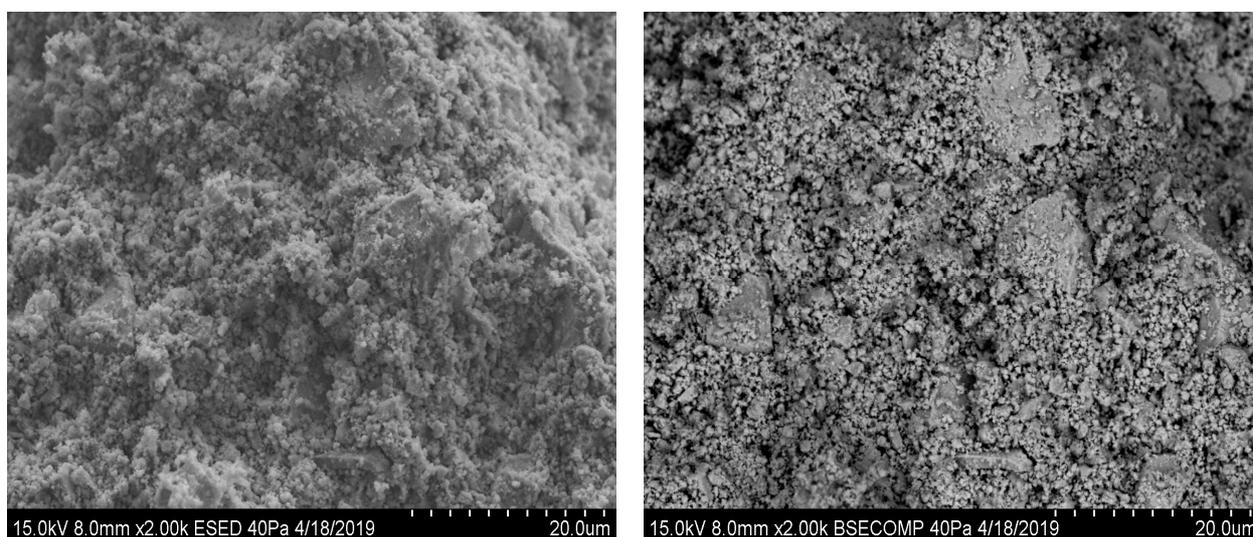


Рис. 12. СЭМ-изображение порошка гафната европия после спекания в муфельной печи

Fig. 12. SEM-image of europium hafnate powder after sintering in a muffle furnace

СЭМ – изображения порошка гафната церия после спекания в муфельной печи показывает заметный рост зерна до 10 мкм, а так же наличие мелких пор до 2-3 мкм. Результаты исследований гафната европия показывают отсутствие пор и размер зерна около 1 мкм. Результаты с растрового электронного микроскопа подтверждают график зави-

симости относительной плотности гафнатов лантаноидов от давления прессования после спекания.

Результаты исследования твердости порошков гафнатов лантаноидов, сформированных при давлениях 400, 500, 600 МПа и спеченных при температуре 1200 °С, представлены на рис. 13.

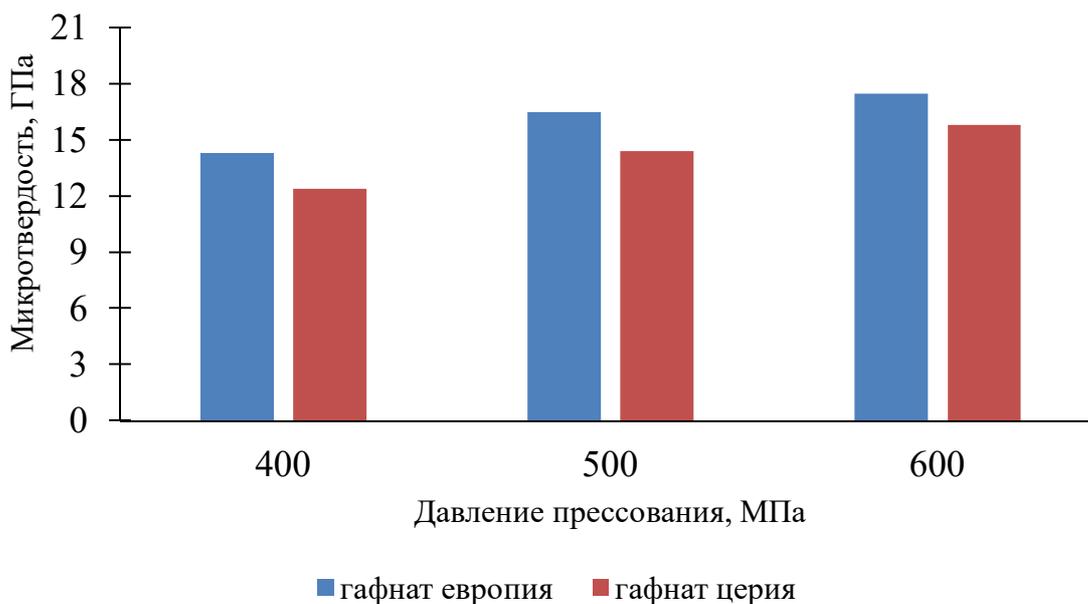


Рис. 13. Микротвердость заготовок из механосинтезированных порошков гафната церия и гафната европия

Fig. 13. Microhardness of billets from mechanothesized cerium hafnate and europium hafnate powders

Как показано на диаграмме, самой большой микротвердостью обладают образцы гафната европия при давлении в 600 МПа. Это связано с тем, что спрессованные образцы гафната европия после спекания имеют самую большую относительную плотность, мелкие равномерные поры и однородную мелкозернистую структуру [10-17]. Проведенные исследования подтверждаются сопоставимостью с трудами в этом направлении других авторов [18-22].

Выводы

1. В ходе работы был выявлен оптимальный режим синтеза гафнатов церия и европия. Методом механоактивации были получены порошок гафната церия с размерами частиц 30-100 нм, порошок гафната европия с размерами частиц 40-70 нм.

2. При помощи методов РФА, ПЭМ и СЭМ была изучена смешанная структура полученных механосинтезом порошков гафнатов лантаноидов.

3. Были определены технологические свойства механосинтезированных порошков гафната церия и европия, а так же изучена их уплотняемость и формуемость после прессования и спекания. Образцы из порошка гафната европия имеют относительную плотность больше, чем образцы из порошка гафната церия после консолидации при температурах 900-1200 °С и времени изотермической выдержки от 30 до 120 мин.

4. Исследование микротвердости образцов гафнатов лантаноидов после спекания показали, что образцы гафната европия имеют твердость больше, чем образцы гафната церия.

Список литературы

1. Сравнительные характеристики поглощающих кластерных сборок ВВЭР-1000 и РWR / В.Д. Рисованый, Е.Е. Варлашова, С.Р. Фридман, В.Б. Пономаренко, А.В. Щеглов // Атомная энергия. 1998. Т. 84. Вып. 6. С. 508–513.
2. Анализ разработок конструкций и материалов ПЭЛов ПС СУЗ повышенной работоспособности / Н.Н. Белаш, А.В. Куштым, В.Р. Татаринев, И.А. Чернов // Ядерные и радиационные технологии. 2007. Т. 7. №. 3-4. С. 18-28.
3. Госсет Д. 15 – Материалы поглотителя для реакторов поколения IV // Конструкционные материалы для ядерных реакторов поколения IV. ElsevierLtd. 2017. С. 533-567.
4. Халамейда С.В. Некоторые новые подходы при механохимическом синтезе нанодисперсного титаната бария // Nanosystems, Nanomaterials, Nanotechnologies. 2009. Т. 7. № 3. С. 911–918.
5. Механохимический синтез алюминатов кальция / В.Ю. Прокофьев, А.П. Ильин, Ю.Г. Широков, В.И. Ягодкин // Известия ВУЗов. Химия и химическая технология. 1995. Т.38. №6. С. 28-32.
6. Avvakumov E. G., Senna M., Kosova N. V. Soft mechanochemical synthesis: a basis for new chemical technologies. N.Y.: Springer Science & Business Media, 2001. 208 p.
7. Болдырев В.В. Механохимический синтез в неорганической химии // Сб. СО РАН / под ред. Е.Г. Аввакумова. Новосибирск: Наука, 1991. С. 5–32.
8. Разработка метода получения оксида цинка с применением механохимического синтеза / А.А. Ильин, А.Н. Железнова, А.П. Ильин, Ю.М. Комаров // Известия Вузов. Химия и химическая технология. 2011. Т. 54. №. 1. С. 82-85.
9. Mechanochemical synthesis of copper oxides and salts using the gasliquid mediums / A. A. Ilyin, N.N.Smirnov, R.N. Rumyantsev, A. M. Efremov, A.P. Ilyin // Scientific Israel-Technological Advantages. 2015. V.17. № 3-4. P. 196-208
10. Синдо Д., Оикава Т. Аналитическая просвечивающая электронная микроскопия. М.: Техносфера, 2004. 256 с.
11. Особенности структуры и теплофизические свойства керамических сложных оксидов в системе $Du_2O_3 - HfO_2$ / В. В. Попов, А. П. Менушенков, Я. В. Зубавичус, С.А. Коровин, Е.А. Фортальнова [и др.] // Стекло и керамика. 2016. №. 2. С. 11-17.
12. Красноруцкий В.С. [и др.]. Горячее прессование гранул диспрозия гафната и титаната // Химреагент. 2012. Т. 50, № 11. С. 708–713.
13. Юнг С., Ким С., Ли С. Исследования синтеза и спекания Du_2TiO_5 , полученного химическим процессом на полимерном носителе // J. Nucl. Mater. 2006. Т. 354. С. 137–142.
14. Panneerselvam G. et al. Теплофизические измерения титанатов диспрозия и гадолиния // J. Nucl. Mater. 2004. Т. 327. С. 220–225.

15. Results of SM reactor tests of dysprosium hafnate / V. G. Toporova, V. V. Pimenov, V. D. Risovanyi, A. V. Zakharov // *Atomic Energy*. 2011. 110(4). P. 259–264.

16. Eremeeva Z.V., Kaplanskiy Y.Y., Vorotylo S. et al. Fabrication of Nanodispersed Powder of Dysprosium Hafnate Dy₂HfO₅ by Mechanochemical Method // *Inorg. Mater. Appl. Res.* 2021. 12. P. 1042–1046.

17. Cepeda-Sánchez, N. M., Fuentes, A. F., López-Cota, F. A., Rodríguez-Reyes, M., & Díaz-Guillén, J. A. Mechanochemical synthesis and electrical properties of Gd₂Hf₂–xZrxO₇ solid electrolytes for their use in SOFC's // *Journal of Applied Electrochemistry*, 2015. 45(11). P. 1231–1237.

18. Оценка эффективности применения твердосплавных электроэрозионных порошков в качестве электродного материала / Е.В. Агеев, Г.Р. Латыпова, А.А. Давыдов, Е.В. Агеева // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии*. 2012. № 1. С. 19–22.

19. Проведение рентгеноспектрального микроанализа твердосплавных электроэрозионных порошков / Е.В. Агеев, Г.Р. Латыпова, А.А. Давыдов, Е.В. Агеева // *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2012. № 5-2 (44). С. 99-102.

20. Исследование химического состава порошков, полученных электроэрозионным диспергированием твердого сплава / Е.В. Агеев, Б.А. Семенихин, Е.В. Агеева, Р.А. Латыпов // *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2011. № 5-1 (38). С. 138-144.

21. Получение твердосплавных изделий холодным изостатическим прессованием электроэрозионных порошков и их исследование / Е.В. Агеева, Р.А. Латыпов, П.И. Бурак, Е.В. Агеев // *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2013. № 5 (50). С. 116-125.

22. Порошки, полученные электроэрозионным диспергированием отходов твердых сплавов - перспективный материал для восстановления деталей автотракторной техники / Е.В. Агеев, В.Н. Гадалов, Е.В. Агеева, Р.В. Бобрышев // *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2012. № 1-1 (40). С. 182-189.

References

1. Risovany V.D., Varlashova E.E., Friedman S.R., Ponomarenko V.B., Shcheglov A.V. Sravnitel'nye kharakteristiki pogloshchayushchikh klasternykh sborok VVER-1000 i PWR [Comparative characteristics of absorbing cluster assemblies VVER-1000 and PWR]. *Atomnaya energiya = Atomic Energy*, 1998, vol. 84, is. 6, pp. 508-513.

2. Belash N.N., Kushtym A.V., Tatarinov V.R., Chernov I.A. Analiz razrabotok konstruktсии i materialov PELov PS SUZ povyshennoi ra-botosposobnosti [Analysis of the development of structures and materials of PELS PS SUZ increased efficiency]. *Yadernye i radiatsionnye tekhnologii = Nuclear and Radiation Technologies*, 2007, vol. 7, no. 3-4, pp. 18-28.

3. Gosset D. [15 - Absorber materials for generation IV reactors. Structural materials for generation IV nuclear reactors]. *Konstruktsionnye materialy dlya yadernykh reaktorov pokoleniya IV. ElsevierLtd = ElsevierLtd*, 2017, pp. 533-567.

4. Halameida S.V. Nekotorye novye podkhody pri mekhanokhimicheskom sinteze nanodispersnogo titanata bariya [Some new approaches in the mechanochemical synthesis of nanodisperse barium titanate]. *Nanosystems, Nanomaterials, Nanotechnologies*, 2009, vol. 7, no. 3, pp. 911-918.

5. Prokofiev V.Yu., Ilyin A.P., Shirokov Yu.G., Yagodkin V.I. Mekhanokhimicheskii sintez alyuminatov kal'tsiya [Mechanochemical synthesis of calcium aluminates]. *Izvestiya VUZov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya = Izvestiya VUZov, Chemistry and Chemical Technology*, 1995. vol.38, no. 6, pp. 28-32.

6. Avvakumov E. G., Senna M., Kosova N. V. Soft mechanochemical synthesis: a basis for new chemical technologies. N.Y.: Springer Science & Business Media, 2001. 208 p.

7. Boldyrev V.V. *Mekhanokhimicheskii sintez v neorganicheskoi khimii*. Sb. SO RAN [Mechanochemical synthesis in inorganic chemistry]; ed. by E.G. Avvakumov. Novosibirsk, Nauka Publ., 1991, pp. 5-32.

8. Ilyin A.A., Zheleznova A.N., Ilyin A.P., Komarov Yu.M. Razrabotka metoda polucheniya oksida tsinka s primeneniem mekhanokhimicheskogo sinteza [Development of a method for obtaining zinc oxide using mechanochemical synthesis]. *Izvestiya Vuzov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya = Izvestiya Vuzov. Chemistry and Chemical Technology*, 2011, vol. 54, no. 1, pp. 82-85.

9. Ilyin A. A., Smirnov N.N., Rumyantsev R.N., Efremov A. M., Ilyin A.P. Mechanochemical synthesis of copper oxides and salts using the gasliquid mediums. *Scientific Israel-Technological Advantages*, 2015, vol.17, no. 3-4, pp. 196-208.

10. Shindo D., Oikawa T. *Analiticheskaya prosvechivayushchaya elektronnaya mikroskopiya* [Analytical transmission electron microscopy]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2004. 256 p.

11. Popov V. V., Menushenkov A. P., Zubavichus Ya. V., Korovin S.A., Fortalnova E.A., etc. Osobennosti struktury i teplofizicheskie svoistva keramicheskikh slozhnykh oksidov v sisteme Dy₂O₃ - HfO₂ [Structural features and thermophysical properties of ceramic complex oxides in the Dy₂O₃ - HfO₂ system]. *Steklo i keramika = Glass and Ceramics*. 2016, no. 2, pp. 11-17.

12. Krasnorutsky V.S. and others. Goryachee pressovanie granul disproziya gafnata i titanata [Hot pressing of granules of dysprosium hafnate and titanate]. *Khimreagent = Chemreagent*, 2012, vol. 50, no. 11, pp. 708-713.

13. Jung S., Kim S., Lee S. Issledovaniya sinteza i spekaniya Dy₂TiO₅, poluchennogo khimicheskim protsessom na polimernom nositele [Studies of the synthesis and sintering of Dy₂TiO₅ obtained by a chemical process on a polymer carrier]. *J. Nucl. Mater*, 2006, vol. 354, pp. 137-142.

14. Panneerselvam G. et al. Teplofizicheskie izmereniya titanatov disproziya i gadoliniya [Thermophysical measurements of dysprosium and gadolinium titanates]. *J. Nucl. Mater*, 2004, vol. 327, pp. 220-225.

15. Toporova V. G., Pimenov V. V., Risovanyi V. D., Zakharov A. V. Results of SM reactor tests of dysprosium hafnate [Results of SM reactor tests of dysprosium hafnate]. *Atomic Energy*, 2011, 110(4), pp. 259–264.

16. Eremeeva Z.V., Kaplanskiy Y.Y., Vorotylo S. et al. Fabrication of Nanodispersed Powder of Dysprosium Hafnate Dy₂HfO₅ by Mechanochemical Method. *Inorg. Mater. Appl. Res.* 2021, 12, pp. 1042–1046.

17. Cepeda-Sánchez N. M., Fuentes A. F., López-Cota F. A., Rodríguez-Reyes M., Díaz-Guillén J. A. Mechanochemical synthesis and electrical properties of Gd₂Hf₂-xZrxO₇ solid electrolytes for their use in SOFC's. *Journal of Applied Electrochemistry*, 2015, no. 45(11), pp. 1231-1237.

18. Ageev E.V., Latypova G.R., Davydov A.A., Ageeva E.V. Otsenka effektivnosti primeneniya tverdosplavnykh elektroerozionnykh poroshkov v kachestve elektrodno materiala [Evaluation of the effectiveness of the use of carbide electroerosion powders as an electrode material]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2012, no. 1, pp. 19-22.

19. Ageev E.V., Latypova G.R., Davydov A.A., Ageeva E.V. Provedenie rentgenospektral'nogo mikroanaliza tverdosplavnykh elektroerozionnykh poroshkov [Conducting X-ray spectral microanalysis of carbide electroerosion powders]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2012, no. 5-2 (44), pp. 99-102.

20. Ageev E.V., Semenikhin B.A., Ageeva E.V., Latypov R.A. Issledovanie khimicheskogo sostava poroshkov, poluchennykh elektroerozionnym dispergirovaniem tverdogo splava [Investigation of the chemical composition of powders obtained by electroerosive dispersion of a hard alloy]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2011, no. 5-1 (38), pp. 138-144.

21. Ageeva E.V., Latypov R.A., Burak P.I., Ageev E.V. Poluchenie tverdosplavnykh izdelii kholodnym izostaticheskim pressovaniem elektroerozionnykh poroshkov i ikh issledovanie [Obtaining hard-alloy products by cold isostatic pressing of electroerosive powders and their research]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2013, no. 5 (50), pp. 116-125.

22. Ageev E.V., Gadalov V.N., Ageeva E.V., Bobryshev R.V. Poroshki, poluchennye elektroerozionnym dispergirovaniem otkhodov tver-dykh splavov - perspektivnyi material dlya vosstanovleniya detalei avtotraktornoi tekhniki [Powders obtained by electroerosive dispersion of solid alloy waste - a promising material for the restoration of parts of automotive equipment]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2012, no. 1-1 (40), pp. 182-189.

Информация об авторах / Information about the Authors

Еремеева Жанна Владимировна, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры порошковой металлургии и функциональных покрытий, Национальный исследовательский университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация, e-mail: eremeeva-shanna@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1790-5004>

Агеев Евгений Викторович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии материалов и транспорта Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: ageev_ev@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3862-8624>

Шарипзянова Гюзель Харьясовна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры металлургии, Московский политехнический университет, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: guzel@mtw.ru

Капланский Юрий Юрьевич, кандидат технических наук, научный сотрудник научно-учебного центра НУЦ СВС НИТУ МИСиС, Национальный исследовательский университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация, e-mail: yury.kaplansky@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2153-0743>

Ниткин Николай Михайлович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры материаловедения, Московский политехнический университет, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: kolia-msk@yandex.ru

Ахметов Аманкельды Серикбаевич, ассистент кафедры порошковой металлургии и функциональных покрытий, Национальный исследовательский университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация, e-mail: aman1aotero@gmail.com

Орлов Вадим Леонидович, старший преподаватель кафедры иностранных языков, Московский политехнический университет, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: vadimorlov67@mail.ru

Саенко Анна Александровна, магистрант кафедры порошковой металлургии и функциональных покрытий, Национальный исследовательский университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация, e-mail: saenko_anna_99@mail.ru

Zhanna V. Eremeeva, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Professor of Powder Metallurgy and Functional Coatings Department, National Research University "MISIS", Moscow, Russian Federation, e-mail: eremeeva-shanna@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1790-5004>

Evgeny V. Ageev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Materials Technology and Transport Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: ageev_ev@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3862-8624>

Gyuzel K. Sharipzyanova, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of Metallurgy Department, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation, e-mail: guzel@mtw.ru

Yuri Y. Kaplansky, Cand. of Sci. (Engineering), Researcher at the Scientific and Educational Center of NUC of NUST MISIS, National Research University "MISIS", Moscow, Russian Federation, e-mail: yuri.kaplansky@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2153-0743>

Nikolay M. Nitkin, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of Materials Science Department, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation, e-mail: kolia-msk@yandex.ru

Amankeldy S. Akhmetov, Assistant of the Powder Metallurgy and Functional Coatings Department, National Research University "MISIS", Moscow, Russian Federation, e-mail: aman1aotero@gmail.com

Vadim L. Orlov, Senior Lecturer of the Foreign Languages Department, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation, e-mail: vadimorlov67@mail.ru

Anna A. Saenko, Master's Student of the Powder Metallurgy and Functional Coatings Department, National Research University "MISIS", Moscow, Russian Federation, e-mail: saenko_anna_99@mail.ru