

УДК 621.039.53

<https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-1-19-29>



Механические свойства и коррозионная стойкость горячепрессованных образцов из молибдата диспрозия

Ж. В. Еремеева¹✉, Г. Х. Шарипзянова², В. В. Левина¹

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

² Московский политехнический университет
ул. Большая Семёновская, д. 38, г. Москва 107023, Российская Федерация

✉ e-mail: eremeeva-shanna@yandex.ru

Резюме

Целью данной работы было изучить особенности консолидации, используя метод горячего прессования заготовок из молибдата диспрозия, их механические свойства и коррозионную стойкость.

Методы. Были исследованы технологические и физические свойства механосинтезированного порошка молибдата диспрозия. Свойства и структуру полученного порошка молибдата диспрозия изучали методами химического и рентгенофазового анализов, методом сканирующей электронной микроскопии. Насыпную плотность порошка молибдата диспрозия исследовали по ГОСТ 19440-94. Текучесть порошка молибдата диспрозия определяли по ГОСТ 20899-75. Удельная поверхность молибдата диспрозия определялась при помощи анализатора удельной поверхности NOVA 1200e (США) по методу низкотемпературной адсорбции азота (БЭТ). Рентгенофазовый анализ механосинтезированного порошка молибдата диспрозия проводился на дифрактометре ДРОН-2.0. Было проведено горячее прессование порошка молибдата диспрозия при температуре 1400°C и давлениях 15, 25 и 35 МПа при выдержке под давлением 5 мин.

Результаты. Определена прочность на изгиб горячепрессованных образцов из молибдата диспрозия, установлено, что наибольшее значение предела прочности на изгиб зафиксировано у данных образцов при давлении прессования 35 МПа и составляет 314 МПа. Изучена коррозионная стойкость горячепрессованных образцов из молибдата диспрозия в водном теплоносителе при температуре 100°C. Было зафиксировано, что масса образцов из механосинтезированного молибдата диспрозия в течение всего испытания на коррозионную стойкость в водном теплоносителе практически не изменяется.

Заключение. Испытания на коррозионную стойкость показали отсутствие изменения массы образцов из молибдата диспрозия в течение 60 часов. Предел прочности на изгиб образцов из молибдата диспрозия, полученного горячим прессованием при давлении 35 Па, температуре 1400°C и времени выдержки под давлением 5 мин, составляет 314 МПа.

Ключевые слова: ультрадисперсный порошок; механохимический синтез; молибдат диспрозия; поры; зерна; коррозионная стойкость.

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

Для цитирования: Еремеева Ж. В., Шарипзянова Г. Х., Левина В. В. Механические свойства и коррозионная стойкость горячепрессованных образцов из молибдата диспрозия // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2024. Т. 14, № 4. С. 19–29. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-1-19-29>.

Поступила в редакцию 30.01.2024

Подписана в печать 28.02.2024

Опубликована 26.03.2024

© Еремеева Ж. В., Шарипзянова Г. Х., Левина В. В., 2024

Mechanical Properties and Corrosion Resistance of Hot-Pressed Dysprosium Molybdate Samples

Zhanna V. Ereemeeva¹ ✉, Gyuzel H. Sharipzyanova², Vera V. Levina¹

¹ National Research Technological University MISiS
4 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation

² Moscow Polytechnic University
38 Bolshaya Semyonovskaya Str., Moscow 107023, Russian Federation

✉ e-mail: eremeeva-shanna@yandex.ru

Abstract

The purpose of this work was to study the consolidation features using hot pressing method of dysprosium molybdate billets and to study their mechanical properties and corrosion resistance.

Methods. The technological and physical properties of the mechano-synthesised dysprosium molybdate powder were investigated. Properties and structure of the obtained dysprosium molybdate powder were studied by methods of chemical and X-ray phase analyses and scanning electron microscopy. Bulk density of dysprosium molybdate powder was studied according to GOST 19440-94. Flowability of dysprosium molybdate powder was determined according to GOST 20899-75. The specific surface of dysprosium molybdate was determined using a specific surface analyser NOVA 1200e (USA) by the method of low-temperature nitrogen adsorption (BET). X-ray phase analysis of mechano-synthesised dysprosium molybdate powder was carried out on a diffractometer

Results. The bending strength of hot-pressed dysprosium molybdate specimens was determined, it was found that the highest value of the bending strength was recorded for these specimens at a pressing pressure of 35 MPa and is 314 MPa. The corrosion resistance of hot-pressed dysprosium molybdate samples in aqueous coolant at a temperature of 100 °C was studied. It was recorded that the mass of the mechano-synthesised dysprosium molybdate specimens remained practically unchanged throughout the corrosion resistance test in aqueous coolant.

Conclusion. Tests on corrosion resistance have shown absence of change of mass of samples from dysprosium molybdate during 60 hours. The bending strength of samples from dysprosium molybdate obtained by hot pressing at pressure 35 Pa, temperature 1400 oÑ and time of holding under pressure 5 min is 314 MPa.

Keywords: ultradisperse powder; mechanochemical synthesis; dysprosium molybdate; pores; grains; corrosion resistance.

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

For citation: Ereemeeva Z. V., Sharipzyanova G. H., Levina V. V. Mechanical Properties and Corrosion Resistance of Hot-Pressed Dysprosium Molybdate Samples. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2024; 14(1): 20–31. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-1-19-29>

Received 30.01.2024

Accepted 28.02.2024

Published 26.03.2024

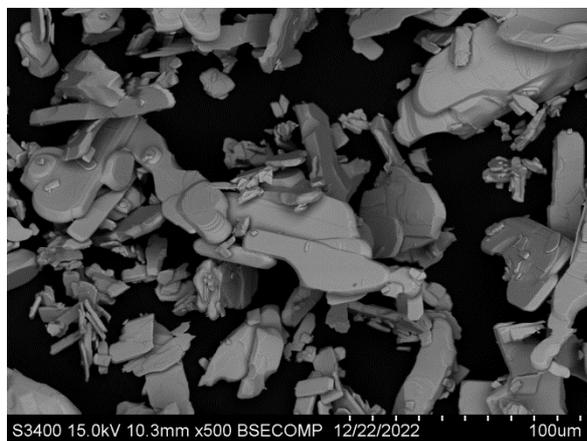
Введение

Современные исследователи ведут интенсивный поиск новых материалов, которые обладают важными функциональными свойствами. Различными методами синтеза в настоящее время получены сложные оксиды редкоземельных металлов (РЗМ), особая роль отводится молибдатам редкоземельных металлов [1].

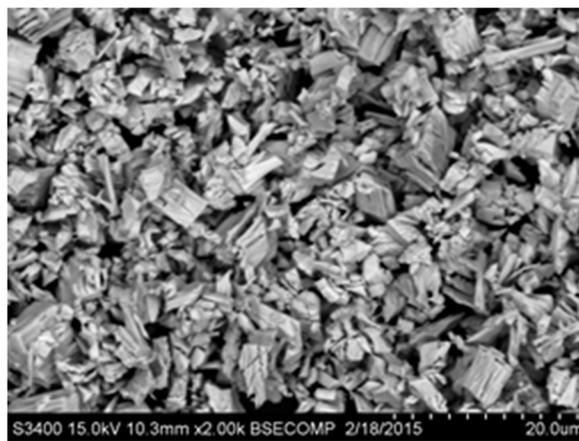
Молибдаты РЗМ отличаются редкими свойствами, а именно оптическими, сегнетоэлектрическими, магнитными и др. [2, с. 35–40] Также они обладают генерационными и спектрально-люминесцентными свойствами и применяются в высококонцентрированных лазерных материалах [3, с. 462–463]. При этом метод синтеза и условия синтеза оказывают значительное влияние на состав получаемых соединений [4, с. 135–135]. Исходя из условий

синтеза и чистоты и состава используемых соединений, можно получить большое многообразие состава у синтезируемых сложных молибдатов [5].

В научных публикациях представлены результаты исследований по молибдатам РЗМ, которые содержат в своем составе ионы молибдена в высшей степени окисления, приведены их фазовые переходы и описаны структуры [6]. При этом практически отсутствует информация об условиях их синтеза и недостаточно описана методика его проведения [7]. Также отсутствуют сведения об использовании двойных молибдатов в водной среде и под воздействием высоких температур [8]. В ряде работ [9] показано, что сложные оксиды РЗМ рационально получать механохимическим синтезом [10, с. 891], который позволяет получать высокодисперсные порошки данных соединений [11], кроме того, механохимическая активация выделяется энергоэффективностью [12] и технологически простым способом ускорения твердофазной реакции [13].



а



б

Рис. 1. СЭМ-изображение частиц порошка: а – MoO_3 ; б – Dy_2O_3

Fig. 1. SEM image of powder particles: a – MoO_3 ; б – Dy_2O_3

Механохимический синтез проводили в планетарно-центробежной мельнице ПЦМ «Активатор-2С» при скорости вращения водила 700–1200 об/мин, скорости вращения барабанов 1400–2400

об/мин, при отношении массы шаров к массе шихты (30–45):1 в атмосфере аргона при давлении 3–5 атм в течение 15–60 минут [14, с. 132].

Свойства и структуру полученного порошка молибдата диспрозия изучали методами химического и рентгенофазового анализов, методом сканирующей электронной микроскопии [15].

Насыпную плотность порошка молибдата диспрозия исследовали по ГОСТ 19440-94. Текучесть порошка молибдата диспрозия определяли по ГОСТ 20899-75 [16]. Удельная поверхность молибдата диспрозия определялась при помощи анализатора удельной поверхности NOVA 1200e (США) по методу низкотемпературной адсорбции азота (БЭТ).

Рентгенофазовый анализ механосинтезированного порошка молибдата диспрозия проводился на дифрактометре ДРОН-2.0 в кобальтовом излучении с длиной волны $1,79021 \text{ \AA}$ в диапазоне углов дифракции 2θ 10° – 130° [17].

Кристаллическое строение молибдата диспрозия было изучено при помощи метода сканирующей электронной микроскопии на аналитическом микроскопе JEM-2100 с системой компьютерного управления, интегрированным устройством наблюдения изображения в режиме

просвечивающего растрового электронного микроскопа и энергодисперсионным рентгеновским спектрометром [18].

Горячее прессование молибдата диспрозия проводили на горячем прессе (Direct Hot Pressing) — DSP-515 SA, Dr. Fritsch Sondermaschinen GmbH, Германия [19].

Испытания горячепрессованных брикетов молибдата диспрозия на коррозионную стойкость проводили, имитируя процесс автоклава при температуре 100 градусов и выдержке в течение 60 часов [20].

Результаты и их обсуждение

Из полученных данных рентгенофазового анализа механосинтезированного порошка молибдата диспрозия следует, что происходит превращение исходных порошков оксидов молибдена и диспрозия в мелкодисперсный порошок, состоящий из соединения Dy_2MoO_6 за 45 минут (рис. 2), а при продолжительности механохимической обработки в течение 15 – 30 минут в получаемом порошке наблюдается непрореагировавший оксид молибдена MoO_3 .

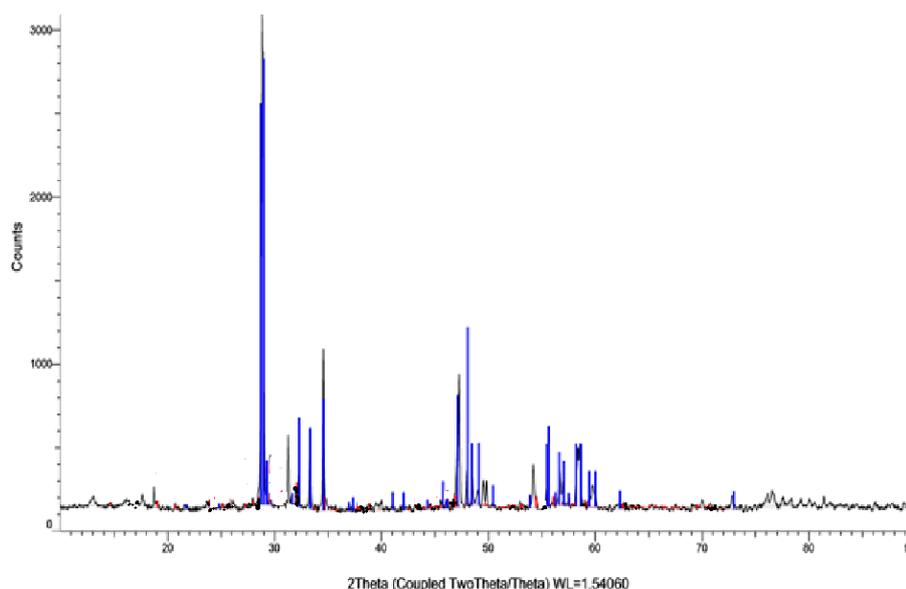


Рис. 2. Рентгенограмма смеси MoO_3 - Dy_2O_3 после продолжительности МХО в течение 45 минут

Fig. 2. X-ray diffraction of the MoO_3 - Dy_2O_3 mixture after the MCHO duration for 45 minutes

Как следует из данных РФА (рис. 2), молибдат диспрозия Dy_2MoO_6 имеет моноклинную кристаллическую решетку с параметрами решетки: $a = 15,56$; $b = 11,06$; $c = 56369 \text{ \AA}$.

На рисунке 3 показаны изображения со сканирующего электронного микро-

скопа. Порошковый материал молибдат диспрозия имеет частицы неравноосной формы размером 5–20 мкм, порошок агломерируется (агломераты размером от 20 до 50 мкм). Также присутствует небольшое количество частиц сферической формы размером до 10 мкм.

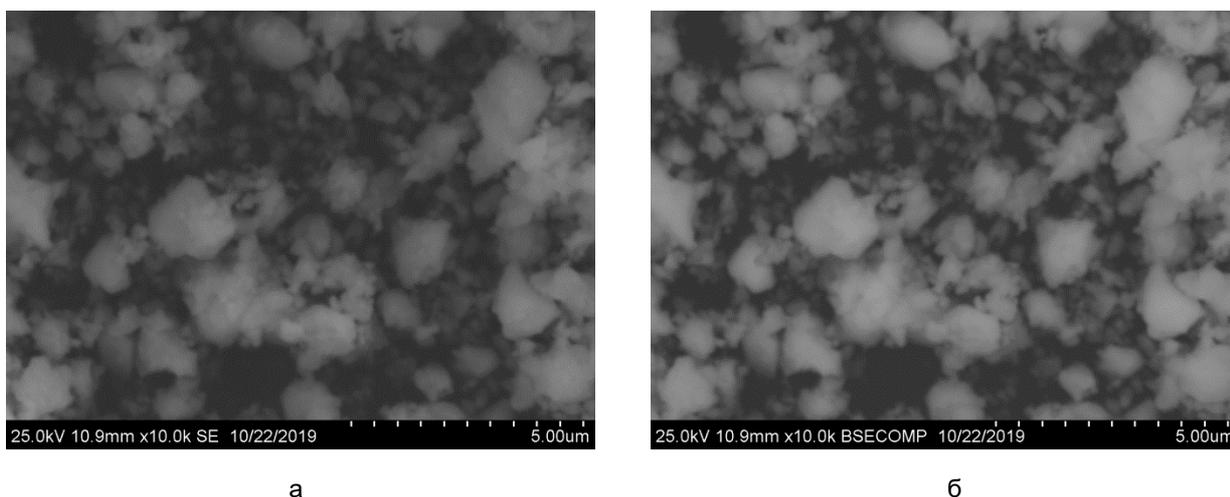


Рис. 3. СЭМ-изображение частиц порошка Dy_2MoO_6 , полученного механохимическим синтезом смеси оксидов молибдена и диспрозия: а – в режиме детектирования вторичных электронов, $\times 5000$; б – в режиме детектирования обратно отраженных электронов, $\times 5000$

Fig. 3. SEM-image of powder particles, Dy_2MoO_6 obtained by mechanochemical synthesis of a mixture of molybdenum and dysprosium oxides: а – in the mode of detection of secondary electrons, $\times 5000$; б – in the mode of detection of back-reflected electrons, $\times 5000$

В таблице 1 представлены технологические свойства порошка молибдата диспрозия, полученного механохимическим синтезом.

Горячее прессование заготовок из механосинтезированного порошка молибдата диспрозия проводили при давлении

15, 25 и 35 МПа и времени выдержки под давлением в течение 5 мин, температура горячего прессования составляла 1400°C . На рисунке 4 представлена гистограмма зависимости относительной плотности от давления горячего прессования.

Таблица 1. Технологические свойства порошка молибдата диспрозия

Table 1. Technological properties of dysprosium molybdate powder

Текущность, с	$\rho_{\text{нас}}, \text{Г/см}^3$	$S_{\text{уд}}, \text{м}^2/\text{Г}$	Ср. размер агломератов, мкм	Ср. размер частиц, мкм
Не течет	2,14-2,16	30-40	20	2-5

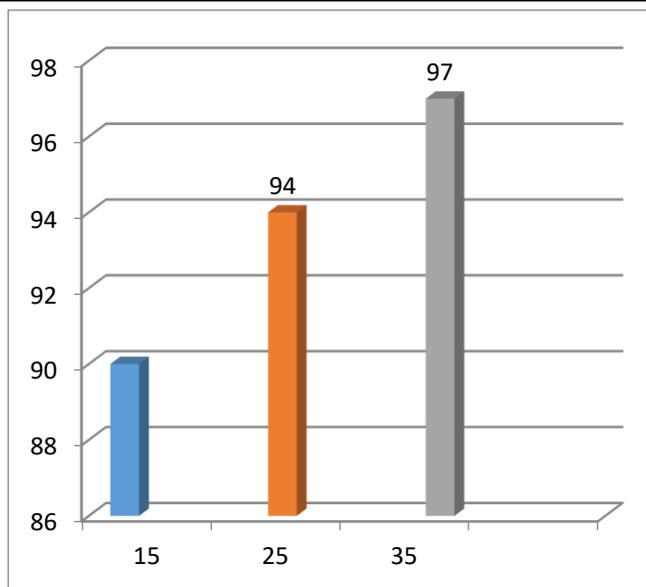


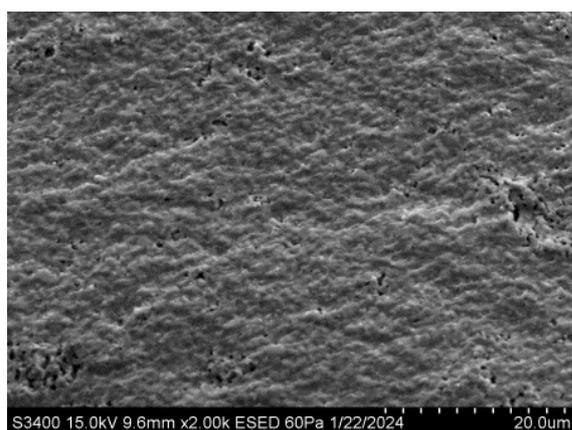
Рис. 4. Зависимость относительной плотности (%) заготовок из механосинтезированного порошка молибдата диспрозия от давления прессования (МПа)

Fig. 4. Dependence of relative density (%) of blanks from mechanically synthesised dysprosium molybdate powder on pressing pressure (MPa)

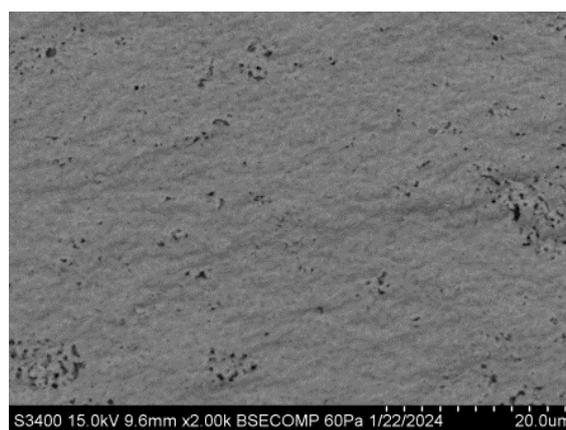
Как видно из гистограммы (см. рис. 4), с увеличением давления горячего прессования происходит увеличение относительной плотности полученных образцов.

На рисунке 5 представлена структура горячепрессованного образца из молибдата диспрозия.

В работе был определен предел прочности на изгиб призматических образцов из молибдата диспрозия, полученных горячим прессованием, от давления прессования. Данные значения представлены на рисунке 6.



а



б

Рис. 5. Структура горячепрессованного образца из молибдата диспрозия, $T = 1400^{\circ}\text{C}$, время 5 мин, $P = 35$ МПа: а – в режиме детектирования вторичных электронов; б – в режиме детектирования обратно отраженных электронов

Fig. 5. Structure of hot-pressed dysprosium molybdate sample, $T=1400$ oC, time 5 min, $P = 35$ MPa: а – in the mode of detection of secondary electrons; б – in the mode of detection of back-reflected electrons

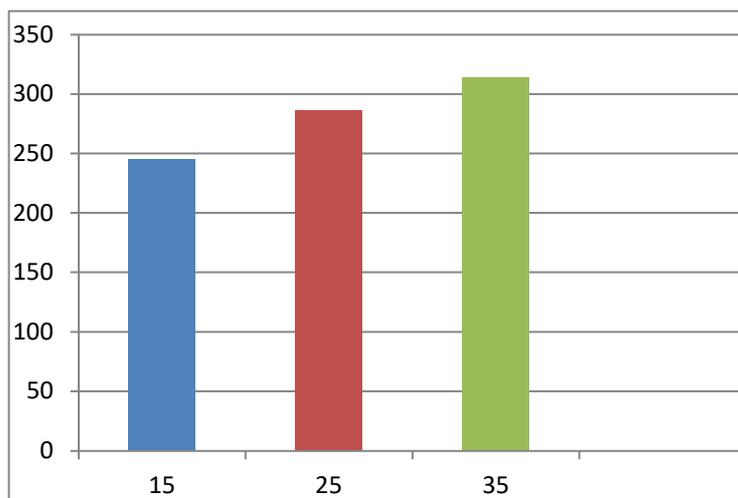


Рис. 6. Предел прочности на изгиб (МПа) от давления горячего прессования (МПа) образцов из молибдата диспрозия

Fig. 6. Flexural strength (MPa) from hot pressing pressure (MPa) of dysprosium molybdate samples

Как видно из гистограммы (см. рис. 6) с увеличением давления горячего прессования идет рост значений предела прочности образцов из молибдата диспрозия на изгиб, что связано с малым количеством пор и малым размером зерна горячепрессованных образцов из молибдата диспрозия, что подтверждается СЭМ-изображением структуры (см. рис. 5).

Перед проведением испытаний на коррозионную стойкость спеченные заготовки из молибдата диспрозия измеряли и взвешивали на аналитических весах с точностью до 0,00001 г. Испытания на коррозионную стойкость проводили в кипящей воде в реакторе. Фиксировали изменение массы образца. Результаты данных испытаний представлены на рисунке 7.

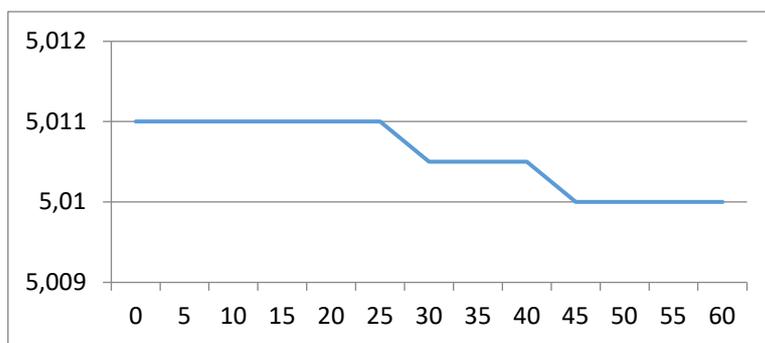


Рис. 7. Зависимость изменения массы (г) образца молибдата диспрозия от времени испытания (ч) в водном теплоносителе при температуре 100°C

Fig. 6. Dependence of change in mass (g) of dysprosium molybdate sample on test time (h) in aqueous coolant at a temperature of 100°C

Представленная на рисунке 7 зависимость показывает, что масса образцов из механосинтезированного молибдата диспрозия во время всего испытания практически не меняется ($\leq 0,001$ г), это обуслов-

лено отсутствием открытой пористости, что характерно для заготовок с высокой относительной плотностью, которая у горячепрессованного молибдата диспрозия составляет 97%.

Выводы

1. Механохимический синтез молибдата диспрозия можно осуществить в планетарной центробежной мельнице ПЦМ «Активатор-2С» при скорости вращения водила 1000–1200 об/мин, скорости вращения барабанов 1800–2400 об/мин, при отношении массы шаров к массе шихты (30–45):1 в атмосфере аргона при давлении 3–5 атм, в течение 30–40 минут. Данные рентгенофазового анализа порошка молибдата диспрозия показывают, что происходит превращение исходных порошков оксидов молибдена и диспрозия в мелкодисперсный порошок, состоящий из соединения Du_2MoO_6 . По результатам РФА молибдат диспрозия Du_2MoO_6 имеет

моноклинную кристаллическую решетку с параметрами решетки: $a = 15,56$; $b = 11,06$; $c = 56369 \text{ \AA}$.

2. Горячим прессованием можно при давлении 35 Па, температуре 1400°C и времени выдержки под давлением 5 мин получить относительную плотность на образцах из молибдата диспрозия 97%.

3. Испытания на коррозионную стойкость показали отсутствие изменения массы образцов из молибдата диспрозия в течение 60 часов.

4. Предел прочности на изгиб образцов из молибдата диспрозия, полученного горячим прессованием при давлении 35 Па, температуре 1400°C и времени выдержки под давлением 5 мин, составляет 314 МПа.

Список литературы

1. Химия редких элементов. Соединения редкоземельных элементов. Молибдаты. Вольфраматы / [А. А. Евдокимов, В. А. Ефремов, В. К. Трунов и др.]; отв. ред. И. В. Тананаев, В. К. Трунов. М.: Наука, 1991. 266 с.
2. Синтезы соединений редкоземельных элементов / В. А. Батырева, А. И. Герман, В. В. Серебрянников, Г. М. Якунина. Томск: Изд-во Томск. ун-та. 1986. Ч. 2. С. 35–40.
3. Особенности фазовых переходов в монокристаллах $Eu_2(MoO_4)_3$ при термобарических воздействиях / И. М. Шмытько, Е. А. Кудренко, В. В. Синицын, Б. С. Редькин, Е. Г. Понятовский // Письма в Журнал теоретической и экспериментальной физики. 2005. Т. 82, № 7. С. 462–463.
4. Трунов В. К., Ефремов В. А., Великодный Ю. А. Кристаллохимия и свойства двойных молибдатов и вольфраматов / отв. ред. Ю. И. Смолин. Л.: Наука, Ленингр. отд-ние, 1986. 172 с.
5. Кожевникова Н. М., Мохосоев М. В. Тройные молибдаты // Журнал неорганической химии. 1992. Т. 37, № 11. С. 2395–3401.
6. Фторид-молибдаты некоторых лантаноидов типа $LnMoO_4F$ / И. М. Звездина, Т. И. Балькина, Л. Н. Комиссарова, Г. Я. Пушкина, Ф. М. Спиридонов, В. М. Шацкий // Координационная химия. 1985. Т. 11, вып. 8. С. 1074–1076.
7. In situ pressure-induced solid-state amorphization in $Sm_2(MoO_4)_3$, $Eu_2(MoO_4)_3$ and $Gd_2(MoO_4)_3$ crystals: chemical decomposition scenario / V. Dmitriev, V. Sinisyn, R. Dilanyan, D. Machon, A. Kuznetsov, E. Ponyatovsky, G. Lucazeau, H. H. P. Weber // J. of Phys. And Chem. Solids. 2003. Vol. 64. P. 307–312.
8. Ferroelectric perovskite nanopowders obtained by mechanochemical synthesis / I. Szafraniak-Wiza, B. Hilczer, E. Talik, A. Pietraszko, B. Malic // Processing and Application of Ceramics. 2010. No. 4. P. 99–106.
9. Shi F., Meng J., Ren Y. Semiconductor to metal transition in Ln_2MoO_9 compounds // Mat. Res. Bull. 1995. Vol. 30, no. 10. P. 1285–1291.
10. Структурные аспекты твердофазной аморфизации в монокристаллах $Eu_2(MoO_4)_3$ / И. М. Шмытько, Е. А. Кудренко, В. В. Синицын, Б. С. Редькин, Е. Г. Понятовский // Физика твердого тела. 2007. Т. 49, № 5. С. 891.

11. Полиморфизм и структура монокристаллов Nd_2MoO_6 / А. М. Антипин, Н. И. Сорокина, О. А. Алексеева, А. П. Дудка, Д. Ю. Чернышов, В. И. Воронкова // Кристаллография. 2017. Т. 62, № 4. С. 551–558.
12. Фазовые равновесия и кристаллическая структура фаз в системах $\text{Ln}_2(\text{MoO}_4)_3\text{-Hf}(\text{MoO}_4)_2$ ($\text{Ln}=\text{La-Lu, Y, Sc}$) / Е. Ю. Бадмаева, Ю. Л. Тушинова, Б. Г. Базаров, С. Ф. Солодовников, Ж. Г. Базарова // Вестник Бурятского государственного университета. Серия 1: Химия. 2004. Вып. 1. С. 21–27.
13. Фазовый переход в новых кислород-ионных проводниках на основе молибдата лантана $\text{La}_2\text{Mo}_2\text{O}_9$ / З. С. Хадашева, Н. У. Венковский, М. Г. Сафроненко, Н. В. Голубко, Е. Д. Политова, С. Ю. Стефанович, А. А. Машковцева // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2003. Т. 67, № 7. С. 972–974.
14. Новые флюоритоподобные редкоземельные молибдаты со смешанной электронно-кислородной проводимостью / В. И. Воронкова, Е. П. Харитонов, И. А. Леонидов, М. В. Патракеев, О. Н. Леонидова, Д. А. Белов // Фундаментальные проблемы ионники твердого тела: 11 международное совещание. М.: Граница, 2012. С. 132.
15. Crystal structure of the oxygen conducting compound $\text{Nd}_5\text{Mo}_3\text{O}_{16}$ / О. А. Alekseeva, A. B. Gagor, A. P. Pietraszko, N. I. Sorokina, N. B. Bolotina, V. V. Artemov, E. P. Kharitonova, V. I. Voronkova // Zlitschrift Kristallographi. 2012. Vol. 227, no. 12. P. 869–875.
16. The crystal structure of $\alpha\text{-La}_2\text{Mo}_2\text{O}_9$ and the structural origin of the oxide ion migration pathway / I. R. Evans, J. A. K. Howard, J. S. O. Evans // Chem. Mater. 2005. Vol. 17. P. 4074–4077.
17. Эгертон Р. Ф. Физические принципы электронной микроскопии. Введение в просвечивающую, растровую и аналитическую электронную микроскопию. М.: Техносфера, 2010. 304 с.
18. Kurtz R., Paulmann C., Bismayer U. Real structure investigations at $\text{PbNd}_4\text{Mo}_3\text{O}_{16}$ // HASYLAB Ann. Rep. 2004. Pt. 1. P. 12812.
19. Ravel B., Newville M. Data analysis for X-ray absorption spectroscopy using IFEFFIT // J. Synchrotron Rad. 2005. Vol. 12. P. 537–541.
20. Гусев А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. М.: Физматлит, 2005. 416 с.

Reference

1. Evdokimov A. A., Efremov V. A., Trunov V. K., eds. Khimiya redkikh elementov. Soedineniya redkozemel'nykh elementov. Molibdaty. Vol'framaty [Chemistry of rare elements. Compounds of rare earth elements. The molybdates. Tungstates]; ed. I. V. Tananaev, B. K. Trunov. Moscow, Nauka Publ., 1991. 266 p.
2. Batyreva V. A., German A. I., Serebryannikov V. V., Yakunina G. M. Sintezy soedinenii redkozemel'nykh elementov [Syntheses of REE compounds]. Tomsk, Tomsk Univ. Publ., 1986, pt. 2, pp. 35–40.
3. Shmytko I. M., Kudrenko E. A., Sinitsyn V. V., Redkin B. S., Ponyatovsky E. G. Features of phase transitions in single crystals $\text{Eu}_2(\text{MoO}_4)_3$ under thermobaric influences. *JETF Letters*, 2005, vol. 82, no. 7, pp. 409–412.
4. Trunov V. K., Efremov V. A., Velikodny Yu. A. Kristallokhimiya i svoistva dvoynykh molibdatov i vol'framatov [Crystal chemistry and properties of double molybdates and tungstates]. Leningrad, Nauka Publ., Leningrad. otd-nie, 1986, pp. 133–135.
5. Kozhevnikova N. M., Mokhosoev M. V. Troinye molibdaty [Triple molybdates]. *Zhurnal neorganicheskoi khimii = Journal of Non-organic Chemistry*, 1992, vol. 37, no. 11, pp. 2395–3401.
6. Zvezdina I. M., Balkina T. I., Komissarova J. H., Pushkina G. Ya., Spiridonov F. M., Shatsky V. M. Ftorid-molibdaty nekotorykh lantanoidov tipa LnMoO_4F [Fluoride - molybdates of some lanthanides of the LnMoO_4F type]. *Koordinatsionnaya khimiya = Coordination Chemistry*, 1985, vol. 11, no. 8, pp. 1074–1076.

7. Dmitriev V., Sinisyn V., Dilanyan R., Machon D., Kuznetsov A., Ponyatovsky E., Lucazeau G., Weber H. H. P. In situ pressure-induced solid-state amorphization in $\text{Sm}_2(\text{MoO}_4)_3$, $\text{Eu}_2(\text{MoO}_4)_3$ and $\text{Gd}_2(\text{MoO}_4)_3$ crystals: chemical decomposition scenario. *J. of Phys. And Chem. Solids*, 2003, vol. 64, pp. 307–312.
8. Szafraniak-Wiza I., Hilczek B., Talik E., Pietraszko A., Malic B. Ferroelectric perovskite nanopowders obtained by mechanochemical synthesis. *Processing and Application of Ceramics*, 2010, no. 4, pp. 99–106.
9. Shi F., Meng J., Ren Y. Semiconductor to metal transition in Ln_2MoO_9 compounds. *Mat. Res. Bull.*, 1995, vol. 30, no. 10, pp. 1285–1291.
10. Shmytko I. M., Kudrenko E. A., Sinitsyn V. V., Redkin B. S., Ponyatovsky E. G. Structural aspects of solid-phase amorphization in $\text{Eu}_2(\text{MoO}_4)_3$ single crystals. *Physics of the Solid State*, 2007, vol. 49, no. 5, pp. 941–948.
11. Antipin A. M., Sorokina N. I., Alekseeva O. A., Dudka A. P., Chernyshov D. Y., Voronkova V. I. Polimorfizm i struktura monokristallov Nd_2MoO_6 [Polymorphism and structure of Nd_2MoO_6 single crystals]. *Kristallografiya = Crystallography*, 2017, vol. 62, no. 4, pp. 551–558.
12. Badmaeva E. Yu., Tushinova Yu. L., Bazarov B. G., Solodovnikov S. F., Bazarova Zh. G. Fazovye ravnovesiya i kristallicheskaya struktura faz v sistemakh $\text{Ln}_2(\text{MoO}_4)_3\text{-Hf}(\text{MoO}_4)_2$ ($\text{Ln}=\text{La-Lu, Y, Sc}$) [Process and crystal structure phase in the system $\text{Ln}_2(\text{MoO}_4)_3\text{-Hf}(\text{MoO}_4)_2$]. *Vestnik Buryatskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 1: Khimiya = Bulletin of the BSU. Series 1: Chemistry*, 2004, no. 1, pp. 21–27.
13. Hadasheva Z. S., Venskovsky N. U., Safronenko M. G., Golubko N. V., Politova E. D., Stefanovich S. Yu., Mashkovtseva A. A. Fazovyi perekhod v novykh kislorod-ionnykh provodnikakh na osnove molibdata lantata $\text{La}_2\text{Mo}_2\text{O}_9$ [Phase transition in new oxygen-ion conductors based on lanthanum molybdate $\text{La}_2\text{Mo}_2\text{O}_9$]. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya fizicheskaya = Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Physics Series*, 2003, vol. 67, no. 7, pp. 972–974.
14. Voronkova V. I., Kharitonova E. P., Leonidov I. A., Patrakeev M. V., Leonidova O. N., Belov D. A. Novye flyuoritopodobnye redkozemel'nye molibdaty so smeshannoi elektronno-kislorodnoi provodimost'yu [New fluorite-like rare earth molybdates with mixed electron-oxygen conductivity]. Fundamental'nye problemy ioniki tverdogo tela. 11 Mezhdunarodnoe soveshchanie [Fundamental problems of solid state ionics. 11 International meeting]. Moscow, Graniza Publ., 2012. 132 p.
15. Alekseeva O. A., Gagor A. B., Pietraszko A. P., Sorokina N. I., Bolotina N. B., Artemov V. V., Kharitonova E. P., Voronkova V. I. Crystal structure of the oxygen conducting compound $\text{Nd}_5\text{Mo}_3\text{O}_{16}$. *Zeitschrift Kristallographie*, 2012, vol. 227, no. 12, pp. 869–875.
16. Evans I. R., Howard J. A. K., Evans J. S. O. The crystal structure of $\alpha\text{-La}_2\text{Mo}_2\text{O}_9$ and the structural origin of the oxide ion migration pathway. *Chemistry Materials*, 2005, vol. 17, pp. 4074–4077.
17. Egerton R. F. Fizicheskie printsipy elektronnoi mikroskopii. Vvedenie v prosvechivayushchuyu, rastrovuyu i analiticheskuyu elektronnyuyu mikroskopiyu [Physical principles of electron microscopy. Introduction to transmission, scanning and analytical electron microscopy]. Moscow, Technosphaera Publ., 2010. 304 p.
18. Kurtz R., Paulmann C., Bismayer U. Real structure investigations at $\text{PbNd}_4\text{Mo}_3\text{O}_{16}$. *HASYLAB Ann. Rep.*, 2004, pt. 1. P. 12812.
19. Ravel B., M. Newville. Data analysis for X-ray absorption spectroscopy using IFEFFIT. *J. Synchrotron Rad.*, 2005, vol. 12, pp. 537–541.
20. Gusev A. I. Nanomaterialy, nanostruktury, nanotekhnologii [Nanomaterials, nanostructures, nanotechnology]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2005. 416 p.

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: 0000-0002-1790-5004

Zhanna V. Eremeeva, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Professor of the Department of Powder Metallurgy and Functional Coatings, National Research University MISIS, Moscow, Russian Federation, e-mail: eremeeva-shanna@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-1790-5004

Шарипзянова Гюзель Харьясовна, кандидат технических наук, доцент, кафедра «Металлургия», Московский государственный политехнический университет, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: guzel@mtw.ru

Gyuzel Kh. Sharipzyanova, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor, Department of Metallurgy, Moscow State Polytechnic University, Moscow, Russian Federation, e-mail: guzel@mtw.ru

Левина Вера Васильевна, доктор технических наук, профессор, кафедра функциональных наносистем и высокотемпературных материалов, Национальный исследовательский университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация, e-mail: vlevina@misis.ru

Vera V. Levina, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Department of Functional Nanosystems and High-Temperature Materials, NUST MISIS, National Research University MISIS, Moscow, Russian Federation, e-mail: vlevina@misis.ru