УДК: 666.64:544.463

ТЕКСТУРНЫЕ СВОЙСТВА СКЕЛЕТНОЙ МЕДИ, ПОЛУЧЕННОЙ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЕМ СПЛАВА ДЕВАРДА

Ю.Е. Романенко, А.В. Афинеевский, Р.Н. Румянцев, А.Ю. Меледин, К.А. Никитин

НИИ Термодинамики и кинетики химических процессов Ивановского государственного химико-технологического университета (ФГБОУ ВО «ИГХТУ»), Шереметевский пр., д. 7, Иваново, Россия, 153000 E-mail: romanenko@isuct.ru, afineevskiy@mail.ru, rnr86@yandex.ru, kirillnikitin09@gmail.com

Рассмотрен процесс выщелачивания сплава Деварда водными растворами гидроксида натрия с целью получения скелетной меди. Проведен сравнительный анализ влияния размера фракции, концентрации гидроксида натрия и температуры на текстурные свойства скелетной меди. Получены данные по элементному и фазовому составу поверхности образцов полученного композита. Изучено влияние условий выщелачивания на пористость и распределения пор по радиусу. Показано, что полученный композит на основе скелетной меди по своим текстурным свойствам близок к катализаторам восстановления соединений содержащих карбонильную группу.

Ключевые слова: скелетная медь, сплав Деварда, выщелачивание, рентгенофазовый анализ, величины удельной поверхности, пористость, морфология поверхности

TEXTURAL PROPERTIES OF SKELETAL COPPER PRODUCED BY LEACHING DEVARDA'S ALLOY

Yu.E. Romanenko, A.V. Afineevskii, R.N. Rumyantsev, A.Yu. Meledin, K.A. Nikitin

Research Institute of Thermodynamics and Kinetics of Chemical Processes, Ivanovo State University of Chemical Technology (FSBEI HE "IGCHTU"), Sheremetevsky Ave., 7, Ivanovo, Russia, 153000 E-mail: romanenko@isuct.ru, afineevskiy@mail.ru, rnr86@yandex.ru, kirillnikitin09@gmail.com

The process of leaching Deward's alloy with aqueous solutions of sodium hydroxide in order to obtain skeletal copper is considered. A comparative analysis of the effect of fraction size, sodium hydroxide concentration, and temperature on the textural properties of skeletal copper has been carried out. Data on the elemental and phase composition of the surface of the obtained composite samples were obtained. The effect of leaching conditions on porosity and pore distribution along the radius has been studied. It is shown that the resulting composite based on skeletal copper is similar in its textural properties to catalysts for the reduction of compounds containing a carbonyl group.

Keywords: skeletal copper, Devarda's alloy, leaching, X-ray diffraction analysis, specific surface area, porosity, surface morphology

Для цитирования:

Романенко Ю.Е., Афинеевский А.В., Румянцев Р.Н., Меледин А.Ю., Никитин К.А. Текстурные свойства скелетной меди, полученной выщелачиванием сплава Деварда. *Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва).* 2024. Т. LXVIII. № 3. С. 82–89. DOI: 10.6060/rcj.2024683.13.

For citation:

Romanenko Yu.E., Afineevskii A.V., Rumyantsev R.N., Meledin A.Yu., Nikitin K.A. Textural properties of skeletal copper produced by leaching Devarda's alloy. *Ros. Khim. Zh.* 2024. V. 68. N 3. P. 82–89. DOI: 10.6060/rcj.2024683.13.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время 90% химической промышленности составляют процессы с участием катализаторов и адсорбентов на основе переходных металлов [1]. Массивные и нанесенные катализаторы на основе меди и ее оксидов широко используются в процессах с участием водорода [2-4]. Самым крупнотоннажным процессом с участием медьсодержащих катализаторов является синтез метанола, используют массивные катализаторы состава CuO/ZnO/Al₂O₃ с содержанием оксида меди 39-86% [5-9]. В основном, в промышленном масштабе массивные медные катализаторы получают методами соосаждения [10, 11]. В лабораторной практике возможно применение методов механохимического синтеза и выщелачивания сплавов [12-14]. Однако данные подходы не нашли широкого распространения в промышленности, это направление можно считать развивающимся.

Цель настоящей работы заключалась в исследовании текстурных свойств скелетной меди, полученной методом выщелачивания сплава Деварда Cu:Al:Zn состава 50:45:5, установлении основных закономерностей влияния условий проведения процесса выщелачивания на структурные характеристики полученных композитов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В работе использовался сплав Деварда ЧДА производства АО «Ленреактив», который предварительно подвергали механохимической активации и тонкому измельчению на планетарной мельнице «Активатор-2SL» в течение 1 мин при частоте 35 Гц с соответствующим ускорением 25,1 g. Соотношение мелющих тел составляло 4:1. Полученный размол при помощи набора сит был разделен на фракции 70-100, 100-120 и 120-140 мкм.

Растворы гидроксида натрия с концентрациями 10, 25 и 35 % мас. готовили из кристаллического гидроксида натрия по методике [15]. Объем раствора гидроксида натрия пошедшей на процесс выщелачивания составлял 10 мл на 1 г сплава. Выцелачивание проводили при термостатировании при температурах 4 (ледяная баня), 20 и 40 °C в течение 2 ч. Порошок сплава Деварда засыпали постепенно при активном перемешивании для исключения локальных перегревов.

Полученную скелетную медь отмывали от щелочи дистиллированной водой до отсутствия реакции по фенолфталеину в смывах. Затем образцы отделили от избытка воды и подвергли сушке с постепенным подъемом температуры до 140 °С для исключения вскипания оставшейся воды.

Таблица 1

Образец	Размер фракции, мкм	Температура выщелачивания, °С	Концентрация раствора NaOH, %	
Ι	100-140	4	25	
II	100-140	40	25	
III	100-140	20	25	
IV	140-200	20	25	
V	80-100	20	25	
VI	100-140	20	40	
VII	100-140	20	10	

Условия обработки образцов

В ходе выполнения экспериментальной части работы были использованы следующие физико-химические методы анализа:

• Рентгенофазовый анализ (РФА) проводили на дифрактометре ДРОН-3М с использованием Си_{Ка}-излучения ($\lambda = 0,15406$ нм, напряжение 40 кВ, 20 мА, углы снятия 2 $\Theta = 10^{\circ}$ -100°, скорость сканирования 4°/мин, дискретность – 0,01°).

• Удельная поверхность определялась с помощью аппаратного комплекса «Sorbi MS», с помощью низкотемпературной адсорбции азота, обработку экспериментальных данных проводили с использованием приближений теории БЭТ. • Элементный состав исследуемых образцов определялся с помощью системы рентгеновской энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС) Oxford AZtec, программно-аппаратного комплекса на основе детекторов X-Max с площадью активной зоны от 10 до 150 мм².

• Микрофотографии получены с помощью растрового электронного микроскопа VEGA 3 TESCAN (СЭМ). По микрофотографиям с помощью режима SE определена морфология частиц катализатора, с помощью режима BSE – дисперсия агломератов меди по размеру. Для определения среднего размера агломерата никеля делалось 200 замеров диаметра частицы.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Идентификацию кристаллических фаз на рентгенограммах проводили путем сравнения рассчитанных межплоскостных расстояний с приведенными в базе данных МИНКРИСТ. Рентгенограммы образцов приведены на рис. 1, результаты обработки рентгенограмм приведены в табл. 2. Межплоскостное расстояние d определяли по условию Брэгга-Вульфа [16]:

$$2 \cdot \mathbf{d} \cdot \sin \theta = \mathbf{n} \cdot \lambda \,,$$

где d – межплоскостное расстояние; θ – угол скольжения (брэгговский угол); n – порядок дифракционного максимума; λ — длина волны.

Размер области когерентного рассеяния (ОКР) D_{SCR} оценивали по модифицированному уравнению Шеррера [17] после линеаризации:

$$\beta_{ph} \cdot \cos\theta = \frac{\lambda}{D_{scR}} + 4 \cdot \varepsilon \cdot \sin\theta$$

где D_{SCR} – размер области когерентного рассеяния, ϵ – значение относительной среднеквадратичной микродеформации (MD), β_{ph} – интегральное физическое уширение профиля рентгеновского образца, рассчитанное с помощью функции Гаусса [18].

Установлено, что выщелачивание сплава Деварда приводит к образованию многокомпонентных систем (рис.1, табл. 2). Рефлексы наиболее высокой интенсивности на рис. 1 соответствуют оксидам меди с различной структурой: тенорит CuO, куприт Cu₂O и парамелаконит Cu₄O₃. Их наличие объясняется окислением поверхностной меди в присутствии влаги и кислорода воздуха во время сушки образцов. Характерные рефлексы металлического цинка Zn и интерметаллида жанхенгита CuZn частично расположены в областях нахождения рефлексов оксидов, что затрудняет их идентификацию.

Как и ожидалось, характерных пиков металлического алюминия Al, а также его оксидов и соединений с медью на рентгене не обнаружено, что свидетельствует о полном удалении его с поверхности образцов в процессе выщелачивания. Анализируя данные ЭДС, полученные с помощью детектора с контрастом по атомному номеру элемента, можно утверждать, что алюминий практически полностью уходит с поверхности, а медь и цинк имеют равномерное распределение. Элементный состав приведен в табл. 3.



Рисунок 1. Рентгенограммы образцов: 1-6,8,9,11-15 – оксиды меди; 7,10 – металлическая медь; 4,5,7 – металлический цинк

Таблица 2

Фазовый состав, соответствующий никам										
N⁰	20	Фазовый состав	Индексы Миллера (h k l) Структура							
1	29,5	Cu ₂ O	(1 1 0)	Куприт						
2	30,6	Cu ₄ O ₃	(2 0 0)	Парамелаконит						
3	35,6	CuO	(1 1 -1), (0 0 2)	Тенорит						
		Cu ₄ O ₃	(2 0 2)	Парамелаконит						
4	36,3	Cu ₂ O	(1 1 1)	Куприт						
		Cu ₄ O ₃	(004) Парамелаконит							
		Zn	(0 0 2)	-						
5	38,7	CuO	(1 1 1), (2 0 0)	Тенорит						
		Zn	(1 0 0)	-						
6	42,2	Cu ₂ O	(2 0 0)	Куприт						
7	43,1	Cu	(1 1 1)	-						
		CuZn	(1 1 0)	Жанхенгит						
		Zn	(1 0 1)	-						
8	43,8	Cu ₄ O ₃	(2 2 0)	Парамелаконит						
9	48,6	CuO	(2 0 - 2)	Тенорит						
10	50,2	Cu	(2 0 0)	-						
11	58	CuO	(2 0 2)	Тенорит						
		Cu ₄ O ₃	(2 2 4)	Парамелаконит						
12	61,4	CuO	(2 0 - 2)	Тенорит						
		Cu ₂ O	(2 2 0)	Куприт						
13	63,8	Cu ₄ O ₃	(400) Парамелаконит							
14	66,1	CuO	(3 1 -2)	Тенорит						
15	68,1	CuO	(2 2 0)	Тенорит						

Фазовый состав, соответствующий пикам

Таблица 3

Параметры поверхности образцов и их физико-химические характеристики

№	ОКР, нм	Удельная поверхность по БЭТ, м ² /г	Элементный состав образцов			
			0	Al	Cu	Zn
Ι	36,3	26,2±0,3	23,38±0,22	5,31±0,1	67,96±0,27	3,34±0,19
II	40,7	25,8±0,1	25,41±0,23	4,18±0,1	67,35±0,27	3,06±0,19
III	33,8	30,2±0,1	23,39±0,22	3,11±0,08	70,56±0,26	2,93±0,18
IV	36,0	29,1±0,1	24,41±0,22	3,94±0,09	68,19±0,26	3,46±0,18
V	36,2	23,1±0,1	13,69±0,2	3,36±0,09	80,64±0,27	2,31±0,19
VI	51,0	30,0±0,1	20,94±0,21	2,97±0,08	74,22±0,25	1,87±0,17
VII	27,7	17,1±0,1	16,68±0,21	4,97±0,1	65,21±0,29	13,14±0,25

Отдельно можно выделить образец V, полученный из мелкой фракции сплава 80-100 мкм, содержащий значительное количество поверхностной меди (пики 7 и 10 на рис. 1 и табл. 2). Это может быть объяснено низкой скоростью сушки и не связано с процессом выщелачивания. Очевидно, в этом случае во время сушки происходит пассивация поверхности меди ее оксидом с образованием поверхностного слоя, препятствующего ее дальнейшему окислению. В образце IV, полученном из крупной фракции, пики металлической меди отсутствовали.

Данные табл. 3 свидетельствуют о том, что наибольшее влияние на структуру поверхности

при выщелачивании оказывала концентрация гидроксида натрия. Согласно данным РФА (рис. 1), при высокой концентрации NaOH (образец VI) на поверхности образуется преимущественно CuO со структурой тенорита, а размер кристаллитов наибольший среди всех образцов. Напротив, при низкой концентрации NaOH (образец VII), основным продуктом является Cu₂O со структурой куприта, размер кристаллитов и удельная поверхность (табл. 3) в этом случае минимальны.

ЭДС показали значительное уменьшение содержания металлического алюминия в образцах после выщелачивания. Содержание цинка Zn также уменьшилось во всех образцах, кроме образца VII, обработанного раствором гидроксидом натрия с низкой концентраций. Исходя из того, что в образце VI наблюдается обратная картина, можно сделать вывод о возможности регулирования содержания цинка концентрацией гидроксида натрия.

Во всех образцах также присутствовало до 0,3 мас.% железа Fe, наличие которого обусловлено размолом исходного сплава в планетарной мельнице железными шариками, кроме того железо в количестве до 0,07 мас.% традиционно входит в исходный сплав Деварда [7].

На рис. 2 представлены изображения поверхности полученных образцов. На поверхности образца I (рис. 2.а) наблюдаются следы механической обработки в виде сколов, трещин, разломов. На поверхности (рис. 2.б) заметны чешуйки размером ~500 нм. На СЭМ снимках также можно наблюдать аморфные образования.



Рисунок 2. СЭМ изображение образцов: а, б – I; в, г – VI; д, е – VII. Размер видимого поля: а, в, д – 31,3 мкм; б, г, е – 6,28 мкм. Детектор: контраст по топографии. Напряжение 5 кВ

С увеличением концентрации водного гидроксида натрия (образец VI, рис. 2.в,г) возрастает дисперсность частиц по отношению к другим образцам. В связи с этим увеличивается кристалличность образца в объеме фазы. Частицы становятся более слоистыми и однородными. Поверхность (рис. 2.г) приобретает губчато-аморфную структуру.

Обработка раствором гидроксида натрия низкой концентрации (образец VII, рис. 2.д) не приводит к разрушению частиц. На поверхности (рис. 2.е) образуются гексогональные пластины, что говорит о большей кристалличности на поверхности образца при аморфном состоянии в объеме фазы.

Полученные изотермы адсорбции-десорб-

ции азота (рис. 3) относятся к IV типу, что по классификации Дубинина [2] свидетельствует о наличии мезопор (диаметр 2-50 нм). Этот факт подтверждается распределением пор по радиусу. Меньший размер пор в образце VI может объясняться малым размером частиц.

Объем пор с радиусом <94,6 нм для образца VI составлял 0,040 см³/г, а для образца VII – 0,026 см³/г.

V – удельный объем монослоя, мл НТД/г (миллилитры при нормальной температуре десорбции на грамм адсорбента); р/р₀ – парциальное давление (в долях от единицы); D – ширина пор; dV/dD – производная зависимости объема пор от их ширины, отнесенная к массе адсорбента.



Рисунок 3. Изотермы низкотемпературной адсорбции/десорбции азота исследуемых образцов и гистограммы распределения пор по радиусу

выводы

Влияние температуры на процесс выщелачивания (образцы I и II) оказалось незначительным – свойства поверхности образцов практически не отличались. Размер частиц исходного сплава (образцы VI и V) также практически не оказывал влияния на процесс выщелачивания. Однако малый размер частиц приводил к более мягкой сушке и, как следствие, малому содержанию оксидов.

Гидроксид натрия увеличивает вклад механоактивации в развитие поверхности, увеличивая микродефекты, полученные при механообработке. Высокая концентрация щелочи вытравливает и диспергирует частицы, за счет чего возрастает площадь удельной поверхности и объем пор. Содержание алюминия и цинка в образцах при этом снижается.

Полученная скелетная медь по своим химическому и фазовому составам близка к медьсодержащим катализаторам процесса восстановления карбонильной группы газообразным водородом. Таким образом, полученный композитный металло-оксидный материал может быть использован в реакторах гидрирования в качестве защитного слоя катализатора.

ЛИТЕРАТУРА

- Афинеевский А.В., Прозоров Д.А., Смирнов Д.В., Смирнов Е.П., Гордина Н.Е., Румянцев Р.Н., Осадчая Т.Ю., Никитин К.А. Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва). 2022. Т. 66. № 4. С. 55–62. DOI: 10.6060/rcj.2022664.8.
- Афинеевский А.В., Прозоров Д.А., Осадчая Т.Ю., Румянцев Р.Н. Гидрирование на гетерогенных катализаторах: монография // Ивановский гос. хим.-технолог. ун-т; Бук. 2020. 476 с. ISBN 978-5-00118-597-0.
- Лапидус А.Л., Гайдай Н.А., Некрасов Н.В., Тишкова Л.А., Агафонов Ю.А., Мышенкова Т.Н. Нефтехимия. 2007. Т. 47. № 2. С. 91–98.
- Kournikova A. A., Rumyantsev R. N., Afineevsky A. V., Borisova T. N., Severgina E. S., & Gordina N. E. ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]. 2024. V. 67. N 2. P. 21–29. DOI: 10.6060/ivkkt.20246702.6866.
- 5. *Розовский А.Я., Лин Г.И.* Теоретические основы процесса синтеза метанола. – М.: Химия, 1990.
- Shimomura K.Y., Ogawa K., Oba M., Kotera Y. Journal of Catalysis. 1978. V. 52. N 2. P. 191–205. DOI: 10.1016/0021-9517(78)90135-5
- 7. Лин Г.И., Самохин П.В., Калошкин С.Д., Розовский А.Я. Кинетика и катализ. 1998. Т. 39. № 4. С. 624–630.
- 8. Афанасьев С.В., Трофимов Д.И., Сергеев С.П. Химическая техника. 2016. № 3. С. 41–41.
- Смирнов Д.В., Румянцев Р.Н., ПрозоровД.А., Борисова Т.Н., Романенко Ю.Е., Афинеевский А.В., Гордина Н.Е. Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2022. Т. 65. Вып. 8. С. 102–110. DOI: 10.6060/ivkkt.20226508.6648.
- 10. Комова З.В., Зрелова И.П., Вейнбендер А.Я., Шкитина В.И., Крендель А.И., Шаркина В.И., Боевская Е.А. Катализ в промышленности. 2007. № 5. С. 43–50.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят Центр коллективного пользования научным оборудованием ИГХТУ за доступ к оборудованию, закупленному при поддержке Минобрнауки России, соглашение № 075-15-2021-671.

The authors thank Center for Shared Use of Scientific Equipment of the ISUCT for access to the equipment purchased with the support of the Ministry of Science and Higher Education of Russia, grant No. 075-15-2021-671.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №21-73-10210, https://rscf.ru/project/21-73-10210/.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation No. 21-73-10210, https://rscf.ru/project/21-73-10210/.

The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.

REFERENCES

- Afineevskii A.V., Prozorov D.A., Smirnov D.V., Smirnov E.P., Gordina N.E., Rumyantsev R.N., Osadchaya T.Yu., Nikitin K.A. Ros. Khim. Zh. 2022. V. 66. N 4. P. 55–62. DOI: 10.6060/rcj.2022664.8.
- Afineevskii A.V., Prozorov D.A., Osadchaya T.Yu., Rumyantsev R.N. Hydrogenation on heterogeneous catalysts: monograph // ISUCT; Book. 2020. 476 p. ISBN 978-5-00118-597-0.
- Lapidus A.L., Gaidai N.A., Nekrasov N.V., Tishkova L.A., Agafonov Yu.A., Myshenkova T.N. Petroleum Chemistry. 2007. V. 47. N 2. P. 91–98.
- Kournikova A.A., Rumyantsev R.N., Afineevsky A.V., Borisova T.N., Severgina E.S., & Gordina N.E. ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]. 2024. V. 67. N 2. P. 21–29. DOI: 10.6060/ivkkt.20246702.6866.
- 5. *Rozovsky A.Ya., Lin G.I.* Theoretical foundations of the methanol synthesis process. M.: Chemistry, 1990.
- Shimomura K.Y., Ogawa K., Oba M., Kotera Y. Journal of Catalysis. 1978. V. 52. N 2. P. 191–205. DOI: 10.1016/0021-9517(78)90135-5
- 7. Lin G.I., Samokhin P.V., Kaloshkin S.D., Rozovsky A.Ya. Kinetics and catalysis. 1998. V. 39. N 4. P. 624–630.
- 8. Afanasyev S.V., Trofimov D.I., Sergeev S.P. Chemical engineering. 2016. N 3. P. 41–41.
- Smirnov D.V., Rumyantsev R.N., Prozorov D.A., Borisova T.N., Romanenko Yu.E., Afineevskii A.V., Gordina N.E. ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]. 2022. V. 65. N 8. P. 102–110. DOI: 10.6060/ ivkkt.20226508.6648.
- Komova Z.V., Zrelova I.P., Weinbender A.Ya., Shkitina V.I., Krendel A.I., Sharkina V.I., Boevskaya E.A. Catalysis in Industry. 2007. N 5. P. 43–50.

- Ning W., Shen H., Liu H. Applied Catalysis A: General. 2001. V. 211. N 2. P. 153–157. DOI: 10.1016/S0926-860X(00)00871-1.
- Широков Ю.Г. Механохимия в технологии катализаторов. Издание ФГБОУ ВПО ИГХТУ. Иваново. 2005. С. 350.
- Андерсон Дж. Структура металлических катализаторов. М.: Мир. 1978. 485 с.
- Печенова Г.Г., Черник А.А. Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва).
 2023. Т. 67. № 3. С. 73–76. DOI: 10.6060/rej.2023673.10.
- Васильев В.П., Морозова Р.П., Кочергина Л.А. Аналитическая химия. Лабораторный практикум: учебное пособие для вузов / Издательство: Дрофа. 2006. 416 с.
- Jost K. Röntgenbeugung in Kristallen; Akad // Vlg: Berlin, Germany. 1975. P. 404.
- Monaco H.L., Artioli G., Viterbo D., Ferraris G., Gilli G., Zanotti G., & Catti M. Fundamentals of crystallography. – Oxford university press, USA, 2002. V. 7.
- Ekström T., Chatfield C., Wruss W., & Maly-Schreiber M. Journal of materials science. 1985. V. 20. P. 1266–1274. DOI: 10.1007/BF01026322.

- Ning W., Shen H., Liu H. Applied Catalysis A: General. 2001. V. 211. N 2. P. 153–157. DOI: 10.1016/S0926-860X(00)00871-1.
- 12. *Shirokov Yu.G.* Mechanochemistry in catalyst technology. ISUCT. Ivanovo. 2005. P. 350.
- 13. Anderson J. Structure of metal catalysts. M., Mir. 1978. 485 p.
- Pechyonova G.G., Chernik A.A. Ros. Khim. Zh. 2023. V. 67. N 3. P. 73–76. DOI: 10.6060/rcj.2023673.10.
- 15. Vasiliev V.P., Morozova R.P., Kochergina L.A. Analytical Chemistry. Laboratory Practical Training: A Textbook for Universities / Drofa. 2006. 416 p.
- Jost K. Röntgenbeugung in Kristallen; Akad // Vlg: Berlin, Germany. 1975. P. 404.
- Monaco H.L., Artioli G., Viterbo D., Ferraris G., Gilli G., Zanotti G., & Catti M. Fundamentals of crystallography. – Oxford university press, USA, 2002. V. 7.
- Ekström T., Chatfield C., Wruss W., & Maly-Schreiber M. Journal of materials science. 1985. V. 20. P. 1266–1274. DOI: 10.1007/BF01026322.

Поступила в редакцию (Received) 12.02.2024 Принята к опубликованию (Accepted) 18.04.2024