

ISSN 2304-6295

Dry mixes for microwave protection covering

Korolev, Aleksandr Sergeevich^{1*} ^(D) Vakhitov, Maksim Grigorevich¹ ^(D) Klygach, Denis Sergeevich¹ ^(D) Zherebtsov, Dmitry Anatolevich¹ ^(D) Mishnev, Maxim Vladimirovich¹ ^(D)

¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

* korolev@sc74.ru

Keywords:

Dry mixes, Microwave/Radiowave protection, Microwave/Radiowave reflecting/ecraning, Microwave/Radiowave absorbing, Electromagnetic, Dielectric, Coating, Plaster, Putty

Abstract:

The research aimed to create highly effective radioprotective mixtures based on graphite particles and dielectric particles of expanded pearlite for multilayer coatings with high radio absorption rates and radio reflection in the layers. The study's object was a multilayer radio-absorbing plaster coating based on graphite particles and dielectric particles of expanded pearlite. Measurements of the radio transmission coefficient and the radio reflection coefficient of a multilayer absorbing plaster coating were carried out in the frequency range from 2 to 8 GHz in an anechoic chamber Rainford EMC3. The assessment results of the radioprotective properties have confirmed the high efficiency of using dry mixtures containing fillers with electromagnetic properties. The mixtures made on an aggregate with electromagnetic properties have a high shielding capacity. Their high radio-absorbing ability distinguishes mixtures combining aggregates with electromagnetic properties and porous dielectric aggregates.

Forming two-layer coatings, in which the base layer is shielding, and the top layer is absorbing, has proven effective. Two-layer coatings allow to achieve a synergistic effect, in which the coating has both high shielding and absorbing properties.

Based on the developments carried out, a radioprotective plaster mixture Ceramix-T IKUR was created. The plaster mixture was successfully used in the creation of alternative measuring sites, including at the Federal State Unitary Enterprise "Production Association" MAYAK, "Chelyabinsk region, Russian Federation (Federal State Unitary Enterprise "Mayak Production Association," Chelyabinsk Region, Russian Federation) and others.

1 Introduction

В строительстве возникает все больше задач по обеспечению радиозащитных функций ограждающих строительных конструкций. Эти задачи возникают как при необходимости изолировать оборудование или организмы от внешних источников мощного радиоизлучения, так и при изоляции внутренних источников радиоволн. Это и экранирование от радиопомех, и создание переговорных комнат, альтернативных измерительных площадок, защиты от базовых станций сотовой связи.

Физической основой радиопоглощения и радиоэкранирования является столкновение радиоволны с электромагнитным материалом с последующим частичным поглощением и частичным отражением электромагнитной структурой [22]. Плотные электромагнитные материалы в большей мере отражают радиоволны, не давая проникать волнам по причине

Korolev, A.S.; Vakhitov M.G.; Klygach D.S.; Zherebtsov D.A.; Mishnev, M.V.

Dry mixes for microwave defence covering;

^{2020;} Construction of Unique Buildings and Structures; 93 Article No 9301 doi: 10.18720/CUBS.93.1

плотности структуры. При внедрении в структуру дисперсных диэлектрических частиц с развитой пористостью обеспечивается возможность проникания и многократного переотражения волн, приводящей к потере энергии и затуханию (Рис. 1).



a) b) Рис. 1. Сферолитно-решеточная модель радиозащитной композитной структуры. a) – радиоотражающая структура, b) – радиопоглощающая структура Figure 1. Spherulitic-lattice model of radiowave defence structure. a) – radiowave reflecting structure, b) – radiowave absorbing structure

Выполнено множество разработок по получению материалов, радиозащитных листов, пластин и изделий. Самыми распространенными способами получения радиозащитных материалов являются:

- 1) Синтез Fe-, C- содержащих соединений (ферриты и карбиды) с электромагнитными свойствами [1], [2], [3, [4], [5];
- 2) Создание композитных материалов с введением в качестве наполнителя или волокон Fe-, C- содержащих компонентов и соединений с электромагнитными свойствами в основном на диэлектрическом полимерном связующем [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13].
- Создание 2- и многослойных материалов, сочетающих в слоях разные электромагнитные, диэлектрические содинения и элементы, формирующие в зонах контакта отражающие и поглощающие переходы [14], [15], [16], [17], [18], [19], [20], [21].

Вместе с тем, результатов по получению радиозащитных смесей для «мокрых» штукатурных работ практически нет. Применение смесей несет с собой ряд преимуществ, главным из которых, помимо легкости в исполнении покрытия, является достижение максимальной непрерывности и замкнутости радиозащитного контура.

Перспективным представляется сочетание обладающих выраженными электромагнитными свойствами частиц графита и диэлектрических частиц вспученного перлита, отличающихся очень высокой внутренней пористостью.

Целью данной статьи является создание высокоэффективных радиозащитных смесей на основе частиц графита и диэлектрических частиц вспученного перлита для многослойных покрытий с высокими показателями радиопоглощения и радиоотражения в слоях.

Объектом исследования было многослойное радиопоглощее штукатурное покрытие на основе частиц графита и диэлектрических частиц вспученного перлита.

Предметом исследования были коэффициент радиопрохождения и коэффициент радиоотражения многослойное поглощающего штукатурного покрытия.

2 Materials and Methods

2.1 Materials

В качестве материалов для получения радиозащитных смесей применяли:

- дисперсный графит фракции 0...1 мм с содержанием углерода С более 95%;
- вспученный перлит фракции 0...1 мм с содержанием SiO₂ более 92%, насыпная плотность 45...50 кг/м³;
- портландцемент В42,5 производства группы ЮУГПК;

Korolev, A.S.; Vakhitov M.G.; Klygach D.S.; Zherebtsov D.A.; Mishnev, M.V. Dry mixes for microwave defence covering;

2020; Construction of Unique Buildings and Structures; 93 Article No 9301 doi: 10.18720/CUBS.93.1

- редиспергируемый полимерный порошок.
- Для оценки радиозащитных свойств были получены два варианта смесей:
- графитовый с процентным содержанием по массе: графит 85%, портландцемент 14%; добавки – 1%;
- 2) графито-перлитовый с процентным содержанием по массе: графит 80%, перлит 3%; портландцемент 16%; добавки 1%.

В первом составе преобладают частицы графита с электромагнитными свойствами, во втором обеспечено равное по объемной концентрации содержание электромагнитных частиц графита и диэлектрических пористых частиц перлита.

На рис. 2 а,б приведена морфология образца смеси №1: графит – 85%, портландцемент – 14%; добавки – 1%. Здесь наблюдаются частицы графита с чешуйчатой структурой различной дисперсности (от 10 до 1000 микрон) и частицы цемента (от 10 до 40 микрон).



a)

b)

Рис. 2. Морфология образца смеси №1. а) увеличение 50 раз, b) увеличение 500 раз. Figure 2. Morphology of the sample mixture No.1. a) 50 times magnification, b) 500 times magnification.



Рис. 3. Морфология образца смеси №2. а) увеличение 50 раз, b) увеличение 500 раз. Figure 3. Morphology of the sample mixture No.2. a) 50 times magnification, b) 500 times magnification.

На рис. 3 а,б приведена морфология образца смеси №2: графит – 80%, перлит – 3%; портландцемент – 16%; добавки – 1%. Здесь поле обзора заполнено поризованными частицами перлита с сотовой поровой структурой, а также продуктами их механического разрушения. Прослеживается способность перлита к распределению между частицами графита и разделению их друг от друга за счет распора лепестковыми обломочными образованиями.

Составы обеспечивали классы по прочности при сжатии B2,5 и B2 соответственно, обеспечивающие достаточную прочность штукатурного покрытия под финишную отделку. Перед нанесением смеси перемешиваются с водой при расходе воды 2 л/кг сухой смеси. Нанесение проводилось штукатурным методом путем наброса и заглаживания теркой. Далее проводилась выдержка в воздушно-сухих условиях до достижения равновесной влажности покрытия в течение 7 сут. Из полученных смесей были изготовлены образцы покрытий с размерами 1000х1000 мм (Табл. 1, рис. 4), полученные путем нанесения смесей на, вырезанные из гипсокартонного листа ГКЛ толщиной 12 мм, подложки.

Таблица 1.	Образцы п	окрытий
Table	1. Covering	samples

Номер образца	Тип материала	Толщина материала, мм
1	Поглощающий	10
2	Отражающий	10
3	Комбинированный (отражающий [5 мм] + поглощающий [15мм])	20

2.2 Methods

Измерения образцов проводились в безэховой камере Rainford EMC3 (Рис. 4) Центра электромагнитных измерений Института радиоэлектроники и информационных технологий-РТФ ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина», Екатеринбург, Российская Федерация (Ural Federal University, Yekaterinburg, Russian Federation).



Рис. 4. Измерение коээфициента передачи электромагнитных волн Figure 4. Measurement of the coefficient of transmission of electromagnetic waves

Схема измерений коэффициента передачи электромагнитных волн показана на рисунке 5.



Рис. 5. Схема измерений коэффициента передачи электромагнитных волн 1 – испытываемый образец, 2 – векторный анализатор параметров цепей, 3 – соединительный кабель, 4 – измерительная антенна, 5 – поворотное устройство, 6 – область пространства, существенная для распространения радиоволн Figure 5. Scheme for measuring the transmission coefficient of electromagnetic waves 1 – test sample, 2 – vector network analyzer, 3 – connection cable, 4 – measuring antenna, 5 – rotary device, 6 – region of space essential for radio wave propagation

Измерения проводились следующим образом. Исследуемые образцы материалов были закреплены на штативе на высоте 1 метра в центре открытой площадки на одинаковом расстоянии от передающей и приемной антенны. Растояние от исследуемых образцов до приемной и передающей антенны определяется формулой для дальней зоны [16], [17], [18].

$$R = \frac{2D^2}{\lambda} \tag{1}$$

 λ – длина падающей волны;

D – максимальный габаритный размер антнны.

Центр образца совпадал с фазовыми центрами приемной и передающей антенны.

С помощью комплексного измерителя коэффициентов передачи был измерен уровень коэффициента коэффициента отражения S11 передачи S21 в децибелах.

3 Results and Discussion

3.1 Результаты электродинамических измерений образцов покрытий

На рис. 6 приведены графики зависимостей коэффициента прохождения S21 и коэффициента отражения S11 для образца поглощающего покрытия (образец 1).



Рис. 6. Коэффициент отражения S11 и прохождения S21 образца в диапазоне частот от 2 ГГц до 8 ГГц для поглощаюшего слоя Figure 6. Reflectance S11 and transmission S21 of the sample in the frequency range from 2 GHz to 8 GHz for the absorbing layer

Из измеренных значений S – параметров для поглощающего материала видно, что коэффициент отражения S11 в заданном диапазоне частот меньше – 5 дБ, что соответсвует тому, что отражается меньше половины амплитуды электромагнитной волны. Остальная часть волны проходит в материал. Коэффициент прохождения S21 показывает значение амплитуды электромагнитной волны после прохождения через материал. Значение коэффициента прохождения в диапазоне частот от 2 до 8 ГГц меньше – 22.5 дБ, т.е. прошло 7.5% от уровня падающей волны.

На рис. 7 приведены графики зависимостей коэффициента прохождения S21 и коэффициента отражения S11 для образца отражающего покрытия (образец 2).



Рис. 7. Коэффициент отражения S11 и прохождения S21 в диапазоне частот от 2 ГГц до 8 ГГц для отражающего слоя Figure 7. Reflectance S11 and transmission S21 in the frequency range 2 GHz to 8 GHz for the reflective layer

Из измеренных значений S – параметров для отражающего материала видно, что коэффициент отражения S11 в заданном диапазоне частот меньше – 4 дБ, что соответствует тому, что отражается 60% электромагнитной волны. Остальная часть волны проходит в материал. Коэффициент прохождения S21 показывает значение амплитуды электромагнитной волны после прохождения через материал. Значение коэффициента прохождения в диапазоне частот от 2 до 8 ГГц меньше – 31 дБ, т.е. прошло 3% от уровня падающей волны. Уменьшение коэффициента прохождения для отражающего слоя обусловлено тем, коэффициент отражения был больше, чем для поглощающего слоя.

3.2 Результаты электродинамических измерений образцов комбинированного двухслойного покрытия

Результаты испытаний показали высокие радиоотражающие свойства покрытия из смеси с преобладающим содержанием электромагнитных частиц и высокие радиопоглощающие свойства покрытия из смеси с включением диэлектрических частиц, что подтвердило предложенный метод повышения радиопоглощающих свойств композитов.

В связи с этим возникло предположение о возможности повышения радиозащитных свойств при создании двухслойных покрытий, в которых первый основной слой будет исполнять отражающую функцию, а второй слой со стороны источника обеспечивать поглощение как при первичном падении радиоволны, так и при переотражении от основного слоя. Двухслойная модель представлена на рис. 8.



Рис. 8. Двухслойная модель радиозащитной композитной структуры. Figure 8. 2-layer model of radiowave defence composite structure.

На рис. 9-10 приведены графики зависимостей коэффициента прохождения S21 и коэффициента отражения S11 для образца комбинированного покрытия (образец 3).

При измерении образца комбинированного покрытия №3 был сориентирован поглощающим слоем к передающей антенне.

Из полученных результатов измерений видно, что значение коэффициента отражения в диапазоне частот 2 – 8 ГГц в среднем равно – 18 дБ. Это говорит о том, что практически вся энергия электромагнитной волны прошла в материал, а отразилось очень малое значение на уровне 1 - 2%.









Рис. 10. Коэффициент передачи S21 образца комбинированного покрытия в диапазоне частот от 2 ГГц до 8 ГГц Figure 10. Transmission coefficient S21 of a composite coating sample in the frequency range 2 GHz to 8 GHz

При прохождении через материал, значение амплитуды электромагнитной волны уменьшилось до -7.5 дБ. В диапазоне частот 6 – 8 ГГц до -15 дБ, что соответствует уровню 10 – 15% от падающей волны. Остальная энергия поглотилась и рассеилась в материале.

Таким образом создание двухслойных покрытий позволяет значительно повысить их радиозащитные свойства.

4 Conclusions

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы.

1. Результаты оценки радиозащитных свойств подтвердили высокую эффективность применения сухих смесей, содержащих заполнители с электромагнитными свойствами. Смеси, изготовленные на заполнителе с электромагнитными

свойствами, отличаются высокой экранирующей способностью. Смеси, сочетающие заполнители с электромагнитными свойствами и пористые диэлектрические заполнители, отличаются высокой радипоглощающей способностью.

- 2. Эффективным показал себя способ формирования двуслойных покрытий, в которых базовый слой экранирующий, а покровный поглощающий. Это позволяет добиться синергического эффекта, при котором покрытие обладает и высокими экранирующими и поглощающими свойствами.
- 3. На основе проведенных разработок создана и внедрена в производство радиозащитная штукатурная смесь Ceramix-T ИКУР, которая успешно применялась при создании альтернативных измерительных площадок, в том числе на Федеральном государственном унитарном предприятии «Производственное Объединение «МАЯК», Челябинская область, Российская Федерация (Federal State Unitary Enterprise "Mayak Production Association", Chelyabinsk Region, Russian Federation) и других.

5 Acknowledgements

Работа выполнена в рамках государственного задания FENU-2020-0019 Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

References

1. Green, M., Chen, X. Recent progress of nanomaterials for microwave absorption. Journal of Materiomics. 2019. 5(4). Pp. 503–541. DOI:10.1016/j.jmat.2019.07.003 URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352847819300735 (date of application: 19.01.2021).

2. Jazirehpour, M., Shams, M.H. Microwave Absorption Properties of Ba–M Hexaferrite with High Substitution Levels of Mg–Ti in X Band. Journal of Superconductivity and Novel Magnetism. 2017. 30(1). Pp. 171–177. DOI:10.1007/s10948-016-3698-5.

3. Randa, M., Priyono. Ferrite phase of BaFe9(MnCo)1.5Ti1.5O19 as anti-radar coating material. Proceeding - 2015 International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications, ICRAMET 2015. 2016. Pp. 46–49. DOI:10.1109/ICRAMET.2015.7380772. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/7380772 (date of application: 19.01.2021).

4. Das, C.K., Bhattacharya, P., Kalra, S.S. Graphene and MWCNT: Potential Candidate for Microwave Absorbing Materials. Journal of Materials Science Research. 2012. 1(2). Pp. p126. DOI:10.5539/jmsr.v1n2p126. URL: www.ccsenet.org/jmsrURL:http://dx.doi.org/10.5539/jmsr.v1n2p126 (date of application: 19.01.2021).

5. Tian, H., Liu, H.T., Cheng, H.F. Mechanical and microwave dielectric properties of KD-I SiCf/SiC composites fabricated through precursor infiltration and pyrolysis. Ceramics International. 2014. 40(7 PART A). Pp. 9009–9016. DOI:10.1016/j.ceramint.2014.01.113. URL:

https://www.infona.pl//resource/bwmeta1.element.elsevier-28280004-25dc-333d-94e2-15939bdc1ad7 (date of application: 19.01.2021).

6. Afghahi, S.S.S., Jafarian, M., Stergiou, C.A. X-band microwave absorbing characteristics of multicomponent composites with magnetodielectric fillers. Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2016. 419. Pp. 386–393. DOI:10.1016/j.jmmm.2016.06.040.

7. Zherebtsov, D.A., Sapozhnikov, S.B., Galimov, D.M., Smolyakova, K.R., Vinnik, D.A., Mikhailov, G.G., Vakhitov, M.G. Structure and adsorption properties of microporous glassy-carbon materials. Russian Journal of Physical Chemistry A. 2015. 89(5). Pp. 840–845. DOI:10.1134/S0036024415050350. URL:

https://link.springer.com/article/10.1134/S0036024415050350#article-info (date of application: 19.01.2021).

8. Klygach, D.S., Vakhitov, M.G., Zherebtsov, D.A., Kudryavtsev, O.A., Knyazev, N.S., Malkin, A.I. Investigation of electrical parameters of corundum-based material in X-band. Journal of Materials Science: Materials in Electronics. 2017. 28(18). Pp. 13621–13625. DOI:10.1007/s10854-017-

Korolev, A.S.; Vakhitov M.G.; Klygach D.S.; Zherebtsov D.A.; Mishnev, M.V.

Dry mixes for microwave defence covering;

2020; Construction of Unique Buildings and Structures; 93 Article No 9301 doi: 10.18720/CUBS.93.1

7202-1. URL: https://link.springer.com/article/10.1007/s10854-017-7202-1 (date of application: 19.01.2021).

9. Qin, F., Brosseau, C. A review and analysis of microwave absorption in polymer composites filled with carbonaceous particles. Journal of Applied Physics. 2012. 111(6). Pp. 061301. DOI:10.1063/1.3688435. URL: https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.3688435 (date of application: 19.01.2021).

10. Senyk, I., Barsukov, V., Savchenko, B., Shevchenko, K., Plavan, V., Shpak, Y. V., Kruykova, O. Composite materials for protection against electromagnetic microwave radiation. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. 111(1). Pp. 012026. DOI:10.1088/1757-899X/111/1/012026. URL: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/111/1/012026 (date of application: 19.01.2021).

11. Kong, L.B., Li, Z.W., Liu, L., Huang, R., Abshinova, M., Yang, Z.H., Tang, C.B., Tan, P.K., Deng, C.R., Matitsine, S. Recent progress in some composite materials and structures for specific electromagnetic applications. International Materials Reviews. 2013. 58(4). Pp. 203–259. DOI:10.1179/1743280412Y.0000000011. URL:

https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1179/1743280412Y.0000000011 (date of application: 19.01.2021).

12. Lakshmi, K., John, H., Mathew, K.T., Joseph, R., George, K.E. Microwave absorption, reflection and EMI shielding of PU-PANI composite. Acta Materialia. 2009. 57(2). Pp. 371–375. DOI:10.1016/j.actamat.2008.09.018.

13. Rezania, J., Rahimi, H. Investigating the carbon materials' microwave absorption and its effects on the mechanical and physical properties of carbon fiber and carbon black/ polypropylene composites. Journal of Composite Materials. 2017. 51(16). Pp. 2263–2276.

DOI:10.1177/0021998316669578. URL: http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0021998316669578 (date of application: 19.01.2021).

14. Rusly, S.N.A., Matori, K.A., Ismail, I., Abbas, Z., Awang, Z., Zulkimi, M.M.M., Idris, F.M., Zaid, M.H.M., Zulfikri, N.D. Microwave absorption properties of single- and double-layer coatings based on strontium hexaferrite and graphite nanocomposite. Journal of Materials Science: Materials in Electronics. 2018. 29(16). Pp. 14031–14045. DOI:10.1007/s10854-018-9535-9. URL: https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10854-018-9535-9#article-info (date of application: 19.01.2021).

15. Wei, C., Shen, X., Song, F., Zhu, Y., Wang, Y. Double-layer microwave absorber based on nanocrystalline Zn0.5Ni0.5Fe2O4/α-Fe microfibers. Materials and Design. 2012. 35. Pp. 363–368. DOI:10.1016/j.matdes.2011.09.018. URL:

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306911006327 (date of application: 19.01.2021).

16. Han, M., Yin, X., Li, X., Anasori, B., Zhang, L., Cheng, L., Gogotsi, Y. Laminated and Two-Dimensional Carbon-Supported Microwave Absorbers Derived from MXenes. ACS Applied Materials and Interfaces. 2017. 9(23). Pp. 20038–20045. DOI:10.1021/acsami.7b04602. URL: https://www.wizdom.ai/publication/10.1021/ACSAMI.7B04602/title/laminated_and_two_dimensional_ca rbon_supported_microwave_absorbers_derived_from_mxenes (date of application: 19.01.2021).

17. Wang, G., Gao, Z., Tang, S., Chen, C., Duan, F., Zhao, S., Lin, S., Feng, Y., Zhou, L., Qin, Y. Microwave absorption properties of carbon nanocoils coated with highly controlled magnetic materials by atomic layer deposition. ACS Nano. 2012. 6(12). Pp. 11009–11017. DOI:10.1021/nn304630h. URL: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23171130/ (date of application: 19.01.2021).

18. Panwar, R., Lee, J.R. Recent advances in thin and broadband layered microwave absorbing and shielding structures for commercial and defense applications. Functional Composites and Structures. 2019. 1(3). Pp. 032001. DOI:10.1088/2631-6331/ab2863. URL:

https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2631-6331/ab2863/meta (date of application: 19.01.2021).
19. Liu, L., Yang, S., Hu, H., Zhang, T., Yuan, Y., Li, Y., He, X. Lightweight and Efficient
Microwave-Absorbing Materials Based on Loofah-Sponge-Derived Hierarchically Porous Carbons. ACS
Sustainable Chemistry and Engineering. 2019. 7(1). Pp. 1228–1238.

Korolev, A.S.; Vakhitov M.G.; Klygach D.S.; Zherebtsov D.A.; Mishnev, M.V.

Dry mixes for microwave defence covering;

2020; Construction of Unique Buildings and Structures; 93 Article No 9301 doi: 10.18720/CUBS.93.1

DOI:10.1021/acssuschemeng.8b04907. URL:

https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acssuschemeng.8b04907 (date of application: 19.01.2021). 20. Fan, Y., Yang, H., Li, M., Zou, G. Evaluation of the microwave absorption property of flake graphite. Materials Chemistry and Physics. 2009. 115(2–3). Pp. 696–698. DOI:10.1016/j.matchemphys.2009.02.010.

21. Song, W.L., Fan, L.Z., Hou, Z.L., Zhang, K.L., Ma, Y., Cao, M.S. A wearable microwave absorption cloth. Journal of Materials Chemistry C. 2017. 5(9). Pp. 2432–2441. DOI:10.1039/c6tc05577j. URL: https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2017/tc/c6tc05577j (date of application: 19.01.2021).

22. Pang, H., Fan, M., He, Z. A method for analyzing the microwave absorption properties of magnetic materials. Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2012. 324(16). Pp. 2492–2495. DOI:10.1016/j.jmmm.2012.03.018. URL:

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304885312002612 (date of application: 19.01.2021).