

УДК 621.762

DOI: 10.17213/0321-2653-2015-2-53-57

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАГНИТНО-МЯГКОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS ON THE PHYSICAL PROPERTIES OF MAGNETIC-SOFT COMPOSITE MATERIAL

© 2015 г. Ю.Г. Дорофеев, А.В. Бабец, В.В. Михайлов, В.О. Кривошеков

Дорофеев Юрий Григорьевич – д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Материаловедение и технология материалов», Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, г. Новочеркасск, Россия. Тел. (8635) 255-4-09.

Бабец Александр Васильевич – канд. техн. наук, доцент, кафедра «Материаловедение и технология материалов», Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, г. Новочеркасск, Россия. Тел. (8635) 255-4-09.

Михайлов Владимир Владимирович – канд. техн. наук, доцент, кафедра «Электроснабжение промышленных предприятий и городов», Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, г. Новочеркасск, Россия. Тел. (8635) 22-28-02.

Кривошеков Валентин Олегович – аспирант, кафедра «Материаловедение и технология материалов», Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, г. Новочеркасск, Россия. Тел. (8635) 255-4-09. E-mail: mitm2010@rambler.ru, valentin87novosh@mail.ru

Dorofeev Yuriy Grigorevich – Doctor of Technical Sciences, professor, head of department «Materials Science and Technology of Materials», Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novochoerkassk, Russia. Ph. (8635) 255-4-09.

Babets Alexander Vasilievich – Candidate of Technical Sciences, assistant professor, department «Materials Science and Technology of Materials», Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novochoerkassk, Russia. Ph. (8635) 255-4-09.

Mihailov Vladimir Vladimirovich – Candidate of Technical Sciences, assistant professor, department «Electrical supply of the industrial enterprises and cities», Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novochoerkassk, Russia. Ph. (8635) 22-28-02.

Krivoshchekov Valentin Olegovich – post-graduate student, department «Materials Science and Technology of Materials», Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novochoerkassk, Russia. Ph. (8635) 255-4-09. E-mail: mitm2010@rambler.ru, valentin87novosh@mail.ru

Рассмотрен магнитно-мягкий композиционный материал с различным содержанием диэлектрика. В качестве диэлектрической прослойки использовали высокомодульный водный раствор силиката Na, а также силикагель, представляющий собой несодержащий натрия высокомодульный водный раствор силиката. Показано влияние концентрации диэлектрика на процесс уплотнения холоднопрессованных образцов и магнитные характеристики композиционного материала. Сделан вывод о положительном влиянии силикатов на процесс уплотнения порошковых магнитно-мягких материалов, особенно на первом (структурном) этапе прессования. Использование безнатриевых силикатов в качестве прослоек позволяет уменьшить магнитные потери на 35 – 50 % при незначительном снижении магнитной проницаемости.

Ключевые слова: магнитно-мягкий композиционный материал; магнитная проницаемость; магнитная индукция; магнитные потери; железный порошок; диэлектрик; силикат; силикагель.

Soft magnetic composite material with a different dielectric content is considered. High modulus hydrous sodium silicate solution was used for dielectric layer, as well as silica gel, which comprises sodium-free high modulus hydrous solution of silicate. The effect of dielectric concentration on cold-compaction process of samples and magnetic characteristics of the composite material is shown. The conclusion is drawn on positive influence of silicates on process of compaction of soft magnetic powder materials, especially at the first (structural) stage of pressing. The use of sodium-free silicates as layers allows reducing the magnetic losses by 35 – 50 % with a slight decrease in permeability.

Keywords: magnetic-soft composite material; magnetic permeability; magnetic induction; magnetic losses; iron powder; dielectric; silicate; silica gel.

Введение

Магнитно-мягкие композиционные (ММК) материалы, известные за рубежом как SMC, все большее

применение находят в электромагнитных устройствах малой мощности, таких как электродвигатели постоянного и переменного тока, топливные инжекторы и

катушки зажигания ДВС и т. д. [1 – 3]. Возможность переноса трехмерного магнитного потока, сравнительно низкие потери, вызванные вихревыми токами, позволяют изготавливать из них магнитопроводы сложной формы. ММК материалы состоят из ферромагнитных частиц (как правило, железного или легированного порошка), поверхность которых частично или полностью разделена диэлектрическими прослойками. Тип изоляционного материала прослоек во многом определяет основные магнитные характеристики (индукцию насыщения, магнитную проницаемость, магнитные потери и электрическое сопротивление). В качестве материала прослоек используют различные стекломали, эпоксидные смолы, силикаты, соединения фосфора, каучук и т. д. [2 – 9].

Целью данной работы является изучение влияния концентрации диэлектриков на основе силикатов в материалах с ферромагнитной матрицей и технологических параметров изготовления получаемых ММК материалов на их магнитные свойства.

Методика исследования

В качестве ферромагнитной основы использовали железный порошок с минимальным содержанием примесей марки АВС 100.30 (фирма Хёганес, Швеция). Для получения диэлектрической прослойки использовали высокомолекулярный водный раствор силиката Na [6] (материал 1, табл. 1), а также силикагель, представляющий собой высокомолекулярный водный раствор силиката без присутствия Na (материал 2, табл. 1).

Концентрации диэлектрика на основе водного раствора силиката Na составляли 0,30; 0,65; 1,00 % по массе. Компоненты перемешивали в шнековом смесителе в течение 15 мин. После сушки в полученную шихту добавляли 0,5 % по массе органической смазки Kenolube.

Кольцевые образцы размерами $\varnothing 35 \times \varnothing 25 \times 5$ мм из материалов 1 и 2 прессовали в стальной пресс-форме при давлении 600 МПа. Плотность образцов после СХП составляла 6,70–6,82 г/см³. Термообработку образцов проводили в окислительной атмосфере в интервале температур 350 – 700 °С в течение 25 мин. Магнитные свойства определяли методами амперметра, вольтметра и ваттметра после нанесения на образцы намагничивающей W_1 (100 витков) и измерительной обмотки W_2 (100 витков).

Для изучения влияния давления прессования и концентрации диэлектрика на плотность материала 1 и 2 были изготовлены цилиндрические холоднопрессованные образцы диаметром 11,35 мм при различных давлениях прессования (200 – 600 МПа) и концентрациях диэлектрика (0 – 1,5 %).

Результаты экспериментальных данных

В результате эксперимента установлено, что характер изменения плотности при различных давлениях прессования (рис. 1) отличается. Так, при малых концентрациях диэлектрика (до 0,65 % по массе) и небольших давлениях прессования (200 – 400 МПа) наблюдается резкий скачок прессуемости приготовленных шихт.

Таблица 1

Характеристики исходных материалов

Номер материала	Состав	Насыпная плотность, г/см ³			Текущность, с		
		0,30 % по массе	0,65 % по массе	1,00 % по массе	0,30 % по массе	0,65 % по массе	1,00 % по массе
1	АВС 100.30+силикат Na	3,17	3,13	2,95	27	30	32
2	АВС 100.30+силикагель (без Na)	3,15	3,09	2,92	26	28	31

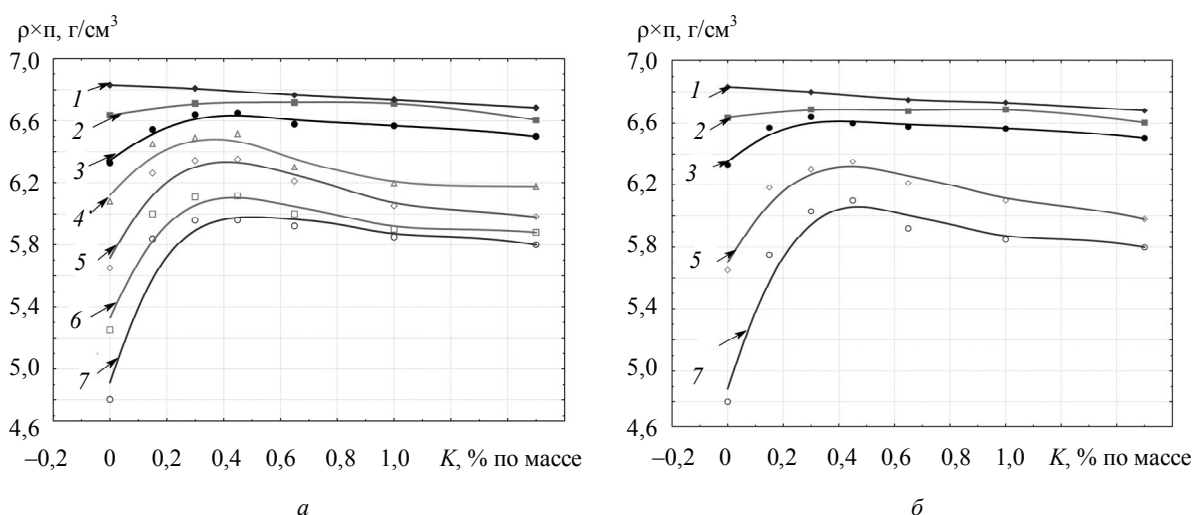


Рис. 1. Влияние концентрации диэлектрика на плотность холоднопрессованных образцов при разных давлениях прессования P (МПа) для материалов 1 (а) и 2 (б): 1 – 600, 2 – 500, 3 – 400, 4 – 350, 5 – 300, 6 – 250, 7 – 200

Данный факт объясняется природой диэлектрика (неорганический полимер), который при низких концентрациях, покрывая частицы порошка тонкой пленкой (150 – 200 нм), способствует проскальзыванию частиц при небольших давлениях прессования, обеспечивая большую величину структурного уплотнения шихты на первой стадии прессования. Незначительное

уменьшение плотности при больших концентрациях диэлектрика (более 1 % по массе) связано с увеличением объема на 1,5 – 2,0 % и, соответственно, его доли в полученных материалах.

Увеличение концентрации диэлектрика в составе материалов 1 и 2 приводит к положительному изменению основных магнитных характеристик (рис. 2 – 4).

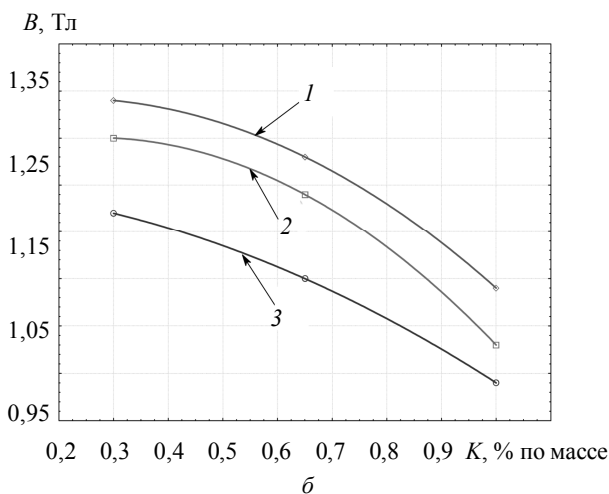
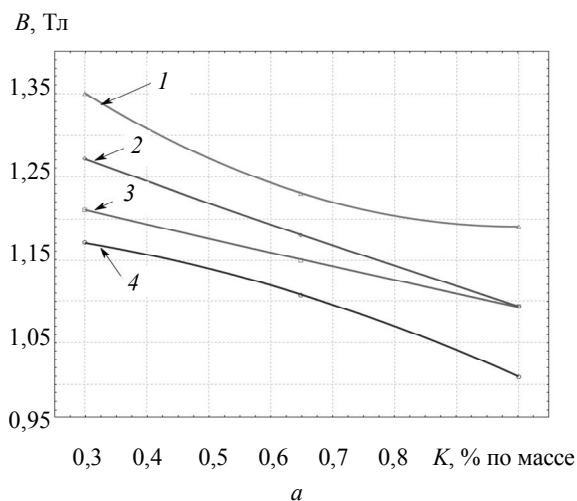


Рис. 2. Влияние концентрации диэлектрика на магнитную индукцию после ТО при различных температурах для материалов 1 (а) и 2 (б): $f = 50$ Гц, $\tau = 25$ мин; 1 – $T = 700$ °С; 2 – $T = 525$ °С; 3 – $T = 350$ °С; 4 – без ТО

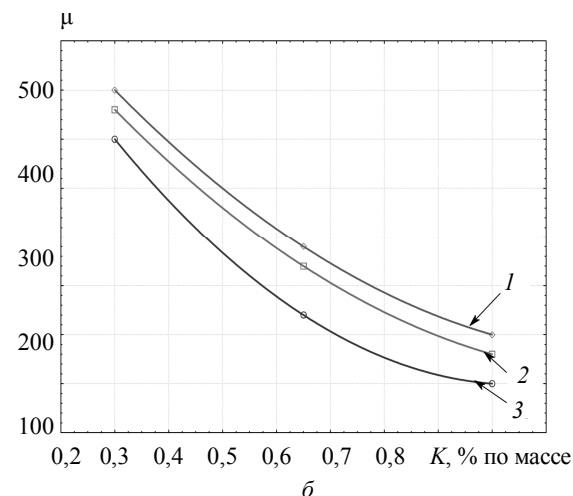
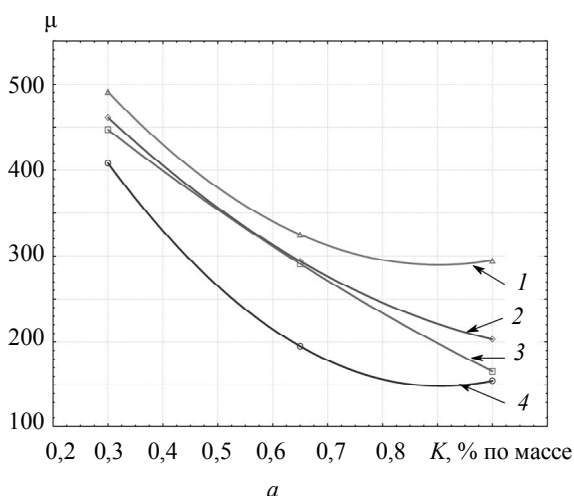


Рис. 3. Влияние концентрации диэлектрика на магнитную проницаемость после ТО при различных температурах для материалов 1 (а) и 2 (б): $f = 50$ Гц, $\tau = 25$ мин; 1 – $T = 700$ °С; 2 – $T = 525$ °С; 3 – $T = 350$ °С; 4 – без ТО

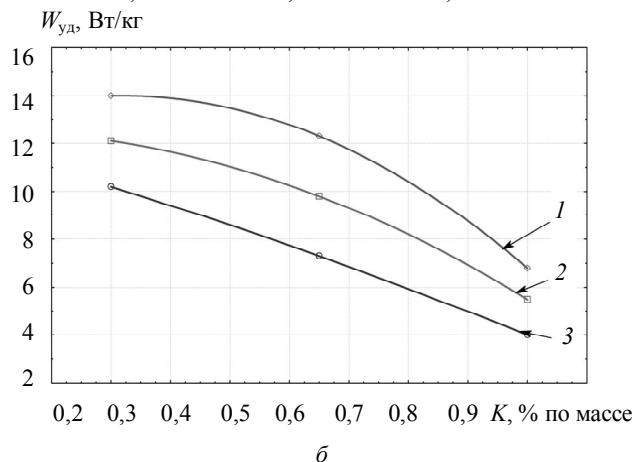
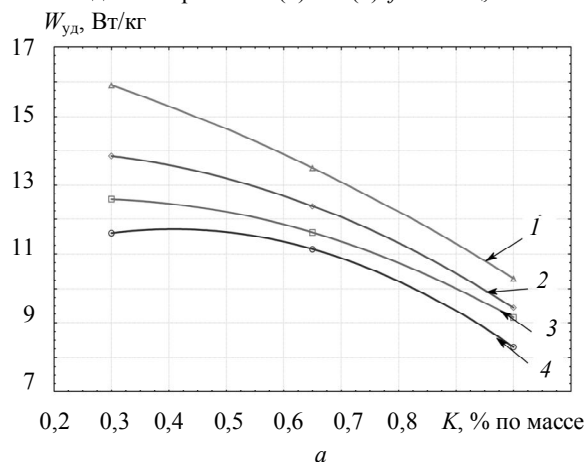


Рис. 4. Влияние концентрации диэлектрика на удельные магнитные потери при разных температурах ТО для материалов 1 (а) и 2 (б): $f = 50$ Гц, $\tau = 25$ мин, $H = 9000$ А/м; 1 – $T = 700$ °С; 2 – $T = 525$ °С; 3 – $T = 350$ °С; 4 – без ТО

Натрий в составе силиката, являясь переносчиком положительного заряда, может понизить диэлектрические свойства покрытия [10]. Как видно из приведенных графиков зависимостей, величины индукций насыщения материалов 1 и 2 практически неизменны при всех исследуемых концентрациях диэлектриков и температурах ТО.

При сравнительно небольшом падении проницаемости μ (3 – 7 %) у материала 2 наблюдается значительное уменьшение магнитных потерь W на 14 – 17 % при малых (0,3 %) концентрациях диэлектрика. При падении проницаемости обоих материалов на 11 – 30 % при больших концентрациях наблюдается уменьшение потерь до 35 – 50 %. Это является подтверждением того, что натрий, увеличивая электропроводность, способствует получению более высоких характеристик проницаемости, но при этом повышает потери на перемагничивание.

Микроструктурный анализ показал, что распределение диэлектриков на исследуемых материалах характеризуется расположением тонких прослоек по периферии частиц в местах их соприкосновения, а также скоплением силикатов рядом с порами в материале (рис. 5).

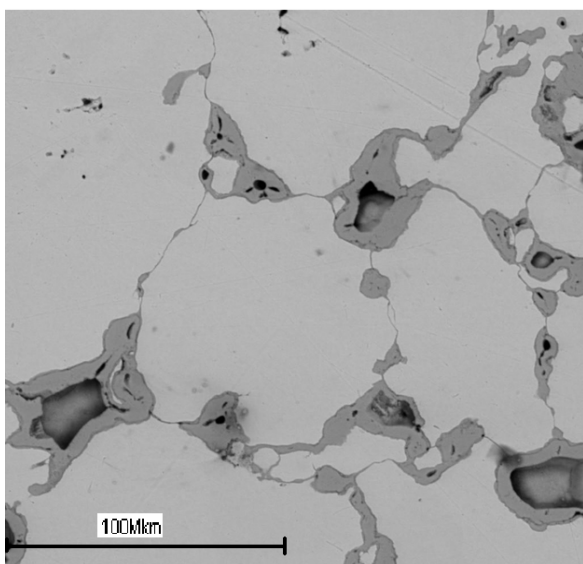


Рис. 5. Микроструктура ММК материала на основе силиката натрия

Выводы

1. Введение диэлектриков на основе силикатов оказывает положительное влияние на процесс уплот-

нения порошковых ММК материалов, особенно на первом (структурном) этапе прессования.

2. Силикаты без присутствия Na, используемые в качестве прослоек, незначительно уменьшают магнитную проницаемость, но при этом снижают магнитные потери на 35 – 50 %, что является положительным эффектом.

Литература

1. Gelinas C., Viarouge P., Cros J. Use of soft magnetic composite materials in industrial applications. 2004. URL: <http://qmp-powders.com> (дата обращения 17.08.2014)
2. Claude Gélinas, Donald Brydges. Insulated Iron Powders for Automotive Applications. 2003. URL: <http://qmp-powders.com> (дата обращения 17.08.2014)
3. Gélinas C., Pelletier S., Lemieux P., Azzi L. Properties and Processing of Improved SMC Materials. 2006. URL: <http://qmp-powders.com> (дата обращения 17.08.2014)
4. Пат. РФ №2389099 Магнитно-мягкие композиционные материалы / Скорман Бьерн, Е Чжоу, Янссон Патрисия - №2008101535/02; заяв. 15.06.2006; опуб. 10.05.2010, Бюл. № 13. 15 с.
5. Kabatova M., Dubrova E., Füzér J., Füzérova J., Kollar P. SMCs Fe/(0.4-2.0 wt.%)SiO₂/Polymer Prepared by Vacuum/Pressure Impregnation. Euro PM2014 – PM Functional Materials. 2014.
6. Пат. РФ №2469430 Магнитно-мягкий композиционный материал / Ю.Г. Дорофеев, В.В. Михайлов, А.В. Бабец, В.О. Кривошеков. №2011137731/07; заяв. 13.09.2011; опуб. 10.12.2012, Бюл. № 34. 5 с.
7. Дорофеев Ю.Г., Михайлов В.В., Кривошеков В.О. Магнитно-мягкий композиционный материал на основе железа для работы в переменных полях // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. 2011. № 6. С. 107 – 109.
8. Бабец А.В., Михайлов В.В., Кривошеков В.О. Магнитно-мягкие композиционные материалы на основе железа // Студенческая научная весна – 2010 : материалы регион. науч.-техн. конф. студ. асп. и молодых ученых Ростовской обл. / Юж.-Рос. гос. техн. ун-т (НПИ). Новочеркасск, 2010. С. 108 – 109.
9. Бабец А.В., Михайлов В.В., Кривошеков В.О., Сычев А.Г. Влияние добавок стекломалей на свойства магнитно-мягких композиционных материалов на основе железа // Результаты исследований – 2011: материалы 60-й науч.-техн. конф. профессорско-преподавательского состава, науч. работников, аспирантов и студентов ЮРГТУ (НПИ) / Юж.-Рос. гос. техн. ун-т (НПИ). Новочеркасск, 2011. С. 254 – 255.
10. Корнеев В.И., Данилов В.В. Жидкое и растворимое стекло. СПб., 1996. 216 с.

References

1. Gelinas C., Viarouge P. and Cros J. Use of soft magnetic composite materials in industrial applications. 2004. Available at: <http://qmp-powders.com> (accessed 17.08.2014).

2. Claude Gélinas, Donald Brydges. Insulated Iron Powders for Automotive Applications. 2003. Available at: <http://qmp-powders.com> (accessed 17.08.2014)
3. Gélinas C., Pelletier S., Lemieux P. and Azzi L.. Properties and Processing of Improved SMC Materials. 2006. Available at: <http://qmp-powders.com> (accessed 17.08.2014)
4. Skorman B'ern, E Chzhou, Yansson Patrisiya. *Magnitno-myagkie kompozicionnye materialy* [Magnetically-soft composite materials]. Pat. RF no. 2389099, 2010.
5. Kabatova Margita, Dubrova Eva, Füzér Jan, Füzérova Jana, Kollar Peter. SMCs Fe/(0.4-2.0 wt.%)SiO₂/Polymer Prepared by Vacuum/Pressure Impregnation. Euro PM2014 - PM Functional Materials. 2014.
6. Dorofeev Yu.G. , Mihajlov V.V., Babec A.V., Krivoschekov V.O. *Magnitno-myagkij kompozicionnyj material* [Soft magnetic composite material]. Pat. RF, no. 2469430, 2012.
7. Dorofeev Yu.G., Mihajlov V.V., Krivoschekov V.O. Magnitno-myagkij kompozicionnyj material na osnove zheleza dlya raboty v peremennyh polyah [Magnetic-soft composite material based of iron intended for work in alternating field]. *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskij region. Tehnicheskie nauki* , 2011, no. 6, pp. 107-109.
8. Babec A.V., Mihajlov V.V., Krivoschekov V.O. Magnitomyagkie kompozicionnye materialy na osnove zheleza [Magneto soft composite material based of iron]. *Studencheskaya nauchnaya vesna – 2010. Materialy region. nauch.-tehn. konf. stud., asp. i molodyh uchenyh Rostovskoj obl.* [Student's scientific spring - 2010: materials of regional scientific and technical conference of students, graduate students and young scientists of the Rostov Region]. Novochoerkassk , YuRGU Publ., 2010, pp. 108-109.
9. Babec A.V., Mihajlov V.V., Krivoschekov V.O., Sychev A.G. Vliyanie dobavok steklo'emalej na svoystva magnitomyagkih kompozicionnyh materialov na osnove zheleza [Influence of additives glass enamel on properties of magneto soft composite materials on the basis of iron]. *Rezultaty issledovanij - 2011: materialy 60-j nauch.-tehn. konf. professorsko-prepodavatel'skogo sostava, nauch. rabotnikov, aspirantov i studentov YuRGU (NPI)* [Results of researches - 2011: materials of the 60-th scientific and technical conference of the faculty, scientists, graduate students and students of YuRGU (NPI)]. Novochoerkassk, YuRGU Publ., 2011, pp. 254-255.
10. Korneev V.I., Danilov V.V. *Zhidkoe i rastvorimoe steklo* [Liquid and soluble glass]. St.Petersburg, Strojizdat St.Petersburg, 1996, 216 p.