

ISSN 1561-8358 (Print)

ISSN 2524-244X (Online)

УДК 537.622.4:621.318.1

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-1-17-24>

Поступила в редакцию 19.02.2020

Received 19.02.2020

**А. К. Вечер<sup>1</sup>, Г. А. Говор<sup>1</sup>, К. И. Янушкевич<sup>1</sup>, У. Т. Бердиев<sup>2</sup>, Ф. Ф. Хасанов<sup>2</sup>**<sup>1</sup>*Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению,  
Минск, Республика Беларусь*<sup>2</sup>*Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта, Ташкент, Республика Узбекистан*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ СИНТЕЗА НА МАГНИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПОРОШКОВ ЖЕЛЕЗА

**Аннотация.** Исследовано влияние условий синтеза на магнитные характеристики композиционных материалов на основе железных порошков ASC 100.29 (Швеция) и LiaoNing (Китай). Поверхность частиц порошков металлического железа капсулирована изоляционным ферритным покрытием, состоящим из окислов железа и фосфидов. Синтез проводился при температуре 150 °С из газовой среды в специальном реакторе при давлении 1 атм. Изолирующие оксидные покрытия наносились как на частицы исходных порошков железа без обработки, так и на предварительно отожженные порошки в инертной атмосфере и в смеси водород-аргон. Для проведения исследований магнитных характеристик методом прессования изготавливались сердечники в виде колец. Зависимость индукции от величины магнитного поля, потери на перемагничивание (гистерезисные потери) по полной и по частной петле регистрировались на экспресс-магнитометре. Величина потерь рассчитывалась по площади петли гистерезиса. Результаты показывают, что композиционные низкочастотные магнитные материалы на основе порошков металлического железа ASC 100.29 (Швеция) и LiaoNing (Китай) имеют близкие по величине магнитные параметры – практически идентичные зависимости  $B = f(H)$ , однако потери на перемагничивание для ASC 100.29 существенно ниже, чем для LiaoNing порошка, при равных условиях синтеза изоляционных покрытий. Возможно использование таких материалов в качестве магнитопроводов в электротехнических устройствах, таких как сердечники высокочастотных трансформаторов и ряда электрических машин. Поскольку такие материалы могут работать на частотах от 1 кГц и выше, это позволит существенно снизить габаритные размеры и повысить эффективность электротехнических изделий.

**Ключевые слова:** магнитно-мягкий композиционный материал, железный порошок, ферритное изоляционное покрытие, дроссели, высокочастотные трансформаторы, статоры и роторы электромашин

**Для цитирования:** Исследование влияния условий синтеза на магнитные характеристики композиционных материалов на основе порошков железа / А. К. Вечер [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2020. – Т. 65, № 1. – С. 17–24. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-1-17-24>

**Alexander K. Vetcher<sup>1</sup>, Gennady A. Govor<sup>1</sup>, Kazimir I. Yanushkevich<sup>1</sup>, Usan T. Berdiev<sup>2</sup>, Fazil F. Khasanov<sup>2</sup>**<sup>1</sup>*Scientific and Practical Material Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk,  
Republic of Belarus*<sup>2</sup>*Tashkent Railway Engineering Institute, Tashkent, Republic of Uzbekistan*

## STUDY OF THE INFLUENCE OF CONDITIONS OF SYNTHESIS ON MAGNETIC CHARACTERISTICS OF COMPOSITE MATERIALS BASED ON IRON POWDERS

**Abstract.** The influence of synthesis conditions on the magnetic characteristics of composite materials based on iron powders ASC 100.29 (Sweden) and LiaoNing (China) is investigated. The surface of metallic iron powders is encapsulated by an insulating ferrite coating, consisting of iron oxides and phosphides. The synthesis was carried out at a temperature of 150 °C from a gaseous medium in a special reactor at a pressure of 1 atm. Insulating oxide coatings were applied both to the initial iron powder without treatment, and to previously annealed powders in an inert atmosphere and in a mixture of hydrogen-argon. To conduct studies of magnetic characteristics, cores in the form of rings were made by pressing method. The dependence of induction vs. magnitude of the magnetic field, magnetization reversal losses (hysteresis losses) in the full and in the private loop were recorded by an express magnetometer. The value of losses was calculated by the hysteresis loops area. The results show that composite low-frequency magnetic materials based on metallic iron ASC 100.29 and LiaoNing powders have similar values of magnetic parameters – almost identical  $B = f(H)$  dependencies, but the magnetization reversal losses for ASC 100.29 are significantly lower than for LiaoNing powder under equal insulating coatings synthesis conditions. It is possible to use such materials as magnetic cores in various electrical devices, such as cores of high-frequency transformers and a number of electrical machines. Since such materials can operate at frequencies from 1 kHz and higher, this will significantly reduce the overall dimensions and increase the efficiency of electrical products.

**Keywords:** soft magnetic composite material, iron powder, ferrite insulating coating, inductors, high-frequency transformers, stators and rotors of electric machines

**For citation:** Vetcher A. K., Govor G. A., Yanushkevich K. I., Berdiev U. T., Khasanov F. F. Study of the influence of conditions of synthesis on magnetic characteristics of composite materials based on iron powders. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2020, vol. 65, no. 1, pp. 17–24 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-1-17-24>

**Введение.** Композиционные материалы с необходимым набором эксплуатационных свойств широко применяются в узлах различных механизмов и машин в таких областях промышленности, как электротехника и электроника. Так как от способа и методики обработки исходных веществ зависят конечные свойства готовых изделий, необходимо правильно выбрать условия получения композиционных магнитно-мягких материалов, обеспечить контролируемый химический состав и структуру, что гарантирует требуемые физические и функциональные свойства.

Для материалов, работающих в переменных электромагнитных полях, важнейшими характеристиками является магнитная проницаемость, индукция и потери на перемагничивание и вихревые токи [1–5]. Величина удельного электрического сопротивления определяет граничную частоту, с которой целесообразно применение данного материала. В настоящее время ряд фирм производит композиционные магнитно-мягкие материалы на основе различных капсулированных порошков железа. Изолирующие слои препятствуют частицам железа контактировать друг с другом. В результате свойства известных композиционных магнитно-мягких материалов близки к свойствам электротехнической стали. Однако наличие изоляционного слоя, состоящего из магнитнеупорядоченных веществ, между отдельными металлическими частицами приводит к уменьшению максимальной магнитной проницаемости материала до  $\mu_m = 100\text{--}500$ , а величина магнитной индукции снижается до  $B_m = 1,6$  Тл [6; патент RU 2 465 669 C1 «Способ изготовления композиционного магнитно-мягкого материала», авторы – Г. А. Говор, В. И. Митюк, А. В. Тамонов]. Для эффективного использования создаваемых композиционных материалов в электротехнических устройствах необходимо повысить магнитную индукцию и магнитную проницаемость, снизить величину потерь в материале. Поскольку указанные электромагнитные параметры получаемых композитов зависят от размеров и морфологии частиц, чистоты исходных порошков; от химического состава и толщины изолирующих покрытий, атмосферы, в которой происходит обработка, необходимо провести комплексное исследование свойств исходных и получаемых материалов, изучить влияние условий обработки и подобрать оптимальный состав наносимых оксидных покрытий.

*Целью данной работы* является исследование влияния условий синтеза композиционных материалов на основе порошков металлического железа с изолирующими покрытиями на его магнитные характеристики.

**Синтез образцов и методики исследования.** Исходя из требований к исходным порошкам и с учетом ценового параметра в качестве основы выбраны два вида порошков: водно-атомизированный порошок ASC 100.29 (Hoganes, Швеция) и производства компании LiaoNing (Китай). Размер частиц обоих порошков составлял 50–150 мкм. Чистота по содержанию примесей порошка ASC 100.29 – 99,9 %, LiaoNing – 98,69 %. Химический состав порошков представлен в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Состав распыленного воздухом порошка LiaoNing (Китай) и распыленного водой порошка ASC 100.29 (Швеция)

Table 1. Composition of air-sprayed LiaoNing powder (China) and water-sprayed powder ASC 100.29 (Sweden)

Тип железного порошка	Fe, %	Mn, %	Si, %	C, %	P, %
LiaoNing (Китай)	98,69	0,35	0,1	0,022	0,028
ASC 100.29 (Швеция)	99,5	0,08	0,04	0,08	0,01

По другим сертификационным параметрам порошки идентичны.

В [7] показано, что в зависимости от толщины изоляционного покрытия и размера частиц исходного порошка металлического железа получаемые композиционные материалы можно разделить на два класса: низкочастотные ( $f < 1$  кГц) и высокочастотные ( $f > 1$  кГц). Для последующих высокочастотных применений с помощью сепаратора S49-1000-1 (рис. 1) отсеяны порошки с размером меньше 100 мкм, для низкочастотных –

с размером больше 100 мкм. После сепарации на поверхность частиц железа наносился изоляционный слой. Порошок железа помещался в специальную камеру и обрабатывался в парах спиртового раствора ортофосфорной кислоты  $H_3PO_4$  при давлении от 0,1 до 1,0 атм (патент ВУ 16908 «Способ изготовления композиционного магнитно-мягкого материала», авторы – Г.А. Говор, В.И. Митюк, А.В. Тамонов; патент ВУ 14066 «Дроссель», авторы – Г.А. Говор, В.М. Дубровенский, А.Л. Шитенков, А.М. Царик, С.П. Худаков; патент ВУ 13277 «Источник питания инверторного типа», авторы – Г.А. Говор, С.В. Авдейчук). В результате на поверхности частиц железа образовалось сложное по составу покрытие из ферритных соединений и фосфатов. Толщина изоляционного слоя на частице железа зависит от времени обработки порошка и концентрации спиртового раствора ортофосфорной кислоты. Морфология порошков изучена с помощью электронного микроскопа Hitachi.

Магнитная проницаемость композитов измерена в диапазоне частот до 2,0 кГц. Для исследования особенностей магнитных свойств изготавливались сердечники в виде колец методом прессования композиционных порошков под давлением 7–8 тн/см<sup>2</sup>. Для изучения влияния отжига на изменение магнитных параметров сердечники отжигались при температуре до 350 °С в различных средах в вакуумной камере (рис. 2). Плотность образцов определена методом гидростатического взвешивания в дистиллированной воде. Измерения важных магнитных характеристик – индукции, потерь, магнитной проницаемости – выполнены на экспресс-магнетометре, разработанном и изготовленном в Научно-практическом центре Национальной академии наук Беларуси по материаловедению (рис. 3). Регистрировались зависимости перемагничивания получаемых образцов, определялась площадь петли гистерезиса в пикселах и рассчитывались потери. Размерность пиксела определялась по измерениям магнитного потока с помощью микроверметра Ф5 050.

**Результаты эксперимента и обсуждение.** На рис. 4 приведены полученные с помощью растрового электронного микроскопа Hitachi изображения порошков металлического железа фирм Hогanes ASC 100.29 и LiaoNing после капсулирования оксидными слоями. Частицы имеют очень сложную морфологию и различные размеры (от 5 до 150 мкм), что позволило при прессовании изделий на основе таких композиционных порошков достичь достаточно высокой плотности (заполняемость достигает 93–95 %), от которой в свою очередь зависит величина электромагнитных параметров спрессованного композита.

На рис. 5 представлены статические кривые намагничивания композитов на основе железных металлических порошков ASC 100.29 (кривая 1) и LiaoNing (кривая 2) с размером зерна



Рис. 1. Сепаратор S49-1000-1 по разделению фракций порошка на меньше 100 мкм и больше 100 мкм

Fig. 1. Separator S49-1000-1 for separation of powder fractions into less than 100  $\mu\text{m}$  and more than 100  $\mu\text{m}$

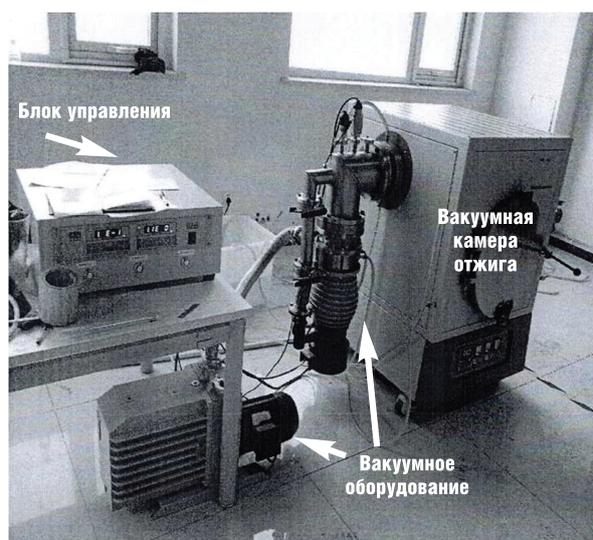


Рис. 2. Вакуумная электропечь для отжига сердечников VF1600

Fig. 2. Vacuum electric furnace for core annealing VF1600

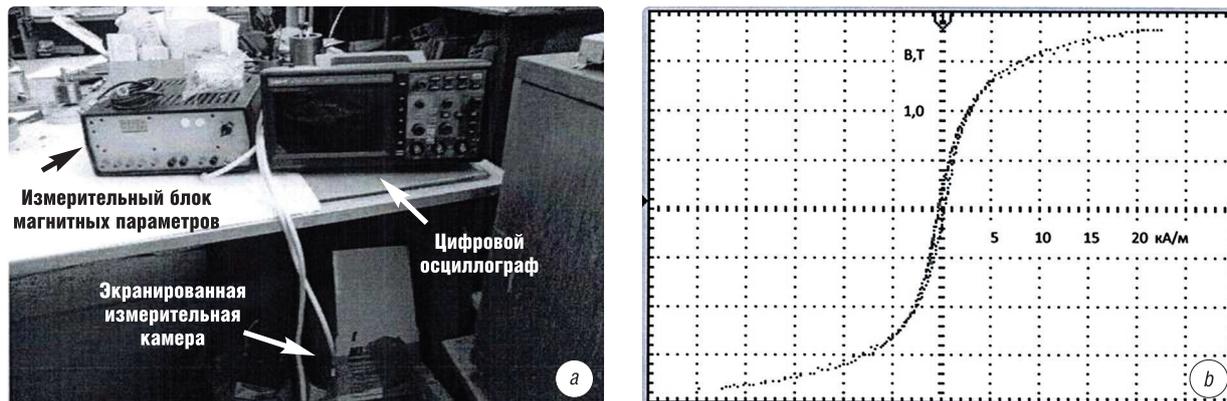


Рис. 3. Внешний вид экспресс-магнетометра (а) и пример получаемой петли гистерезиса исследуемых образцов на экране осциллографа (b)

Fig. 3. The appearance of the express magnetometer (a) and an example of the obtained hysteresis loop of the studied samples on the oscilloscope screen (b)

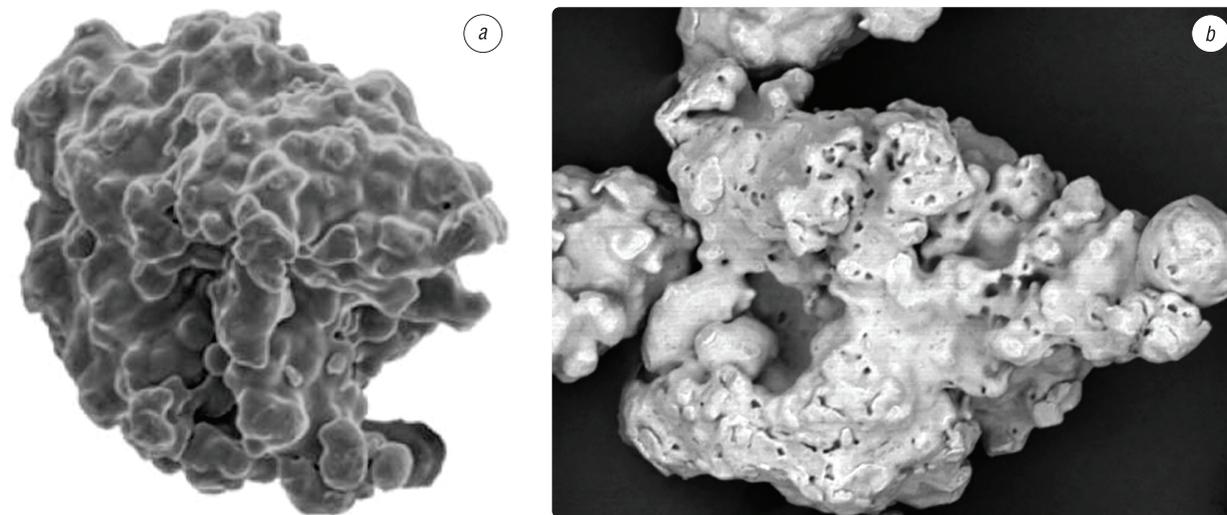


Рис. 4. РЭМ-изображения порошка, обработанного изолирующими ферритными покрытиями: а – ASC 100.29 [12], b – LiaoNing

Fig. 4. SEM image of a powder treated with insulating ferrite coatings: a – ASC 100.29 [8], b – LiaoNing

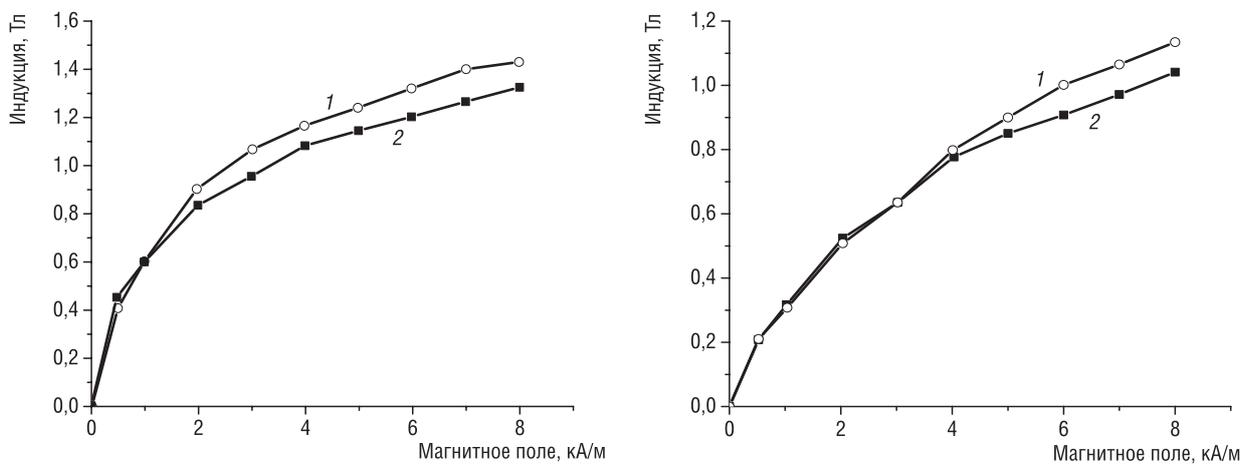


Рис. 5. Зависимости  $B = f(H)$  магнитно-мягкого композита на основе ASC 100.29 (кривая 1) и LiaoNing (кривая 2): а – с размером зерна больше 100 мкм, b – с размером зерна меньше 100 мкм

Fig. 5. Dependences  $B = f(H)$  of a soft magnetic composite based on ASC 100.29 (curve 1) and LiaoNing (curve 2): a – with a grain size more than 100  $\mu\text{m}$ , b – with a grain size less than 100  $\mu\text{m}$

больше 100 мкм и меньше 100 мкм. Зависимости  $B = f(H)$  демонстрируют, что магнитная индукция композиционного материала на основе порошка китайской фирмы в диапазоне полей  $H = 1-9$  кА/м для низкочастотного применения и  $H = 4-9$  кА/м для высокочастотного применения уступает по значению индукции композитам, изготовленным на основе порошка ASC 100.29, на 8 %. Это может быть обусловлено тем, что порошок фирмы LiaoNing кроме чистого железа содержит больше примесей (1,31 % против 0,5 % у ASC 100.29). Кроме того, при прессовании изделий на основе порошка компании Hoganes удалось достигнуть большей плотности готовых изделий ( $\rho = 7,62$  г/см<sup>3</sup>), чем при прессовании порошка производства фирмы LiaoNing ( $\rho = 7,5$  г/см<sup>3</sup>). Поэтому дальнейшие исследования общих потерь проводились на композитах на основе железного металлического порошка ASC 100.29.

Известно, что потери на перемагничивание магнитного материала  $P$  складываются из потерь на гистерезис и потерь на вихревые токи [7]:

$$P = P_e + P_g,$$

где  $P_e$  – потери на вихревые токи,  $P_g$  – потери на гистерезис.

Поскольку каждая частица материала покрыта изоляционным покрытием, потери на вихревые токи минимальны. Значит, общие потери в основном складываются из потерь на гистерезис, которые создаются в процессе смещения стенок доменов на начальной стадии намагничивания. Вследствие неоднородности структуры магнитного материала на перемещение стенок доменов затрачивается магнитная энергия.

Для снижения гистерезисных потерь обычно используют отжиг материала [9]. Такой процесс снимает напряжения внутренней структуры материала, уменьшает количество дислокаций и иных дефектов, а также несколько укрупняет зерно. На рис. 6 представлены зависимости потерь от индукции для материала ASC 100.29 в виде сердечников на частоте 1 кГц при перемагничивании по полной петле до отжига и после отжига в вакууме при 350 °С в течение 3 ч, а на рис. 7 – зависимости индукции от величины магнитного поля для того же материала до отжига и после отжига. Установлено, что отжиг готовых сердечников из композиционного материала позволяет снизить потери и повысить индукцию материала на 5–8 %, что фактически согласуется с [9].

На рис. 8 представлена зависимость гистерезисных потерь от индукции для полного цикла на частоте перемагничивания 1, 2 и 5 кГц для низкочастотного материала на основе ASC 100.29 с размером зерна  $d > 100$  мкм. Видно, что на частотах 1 и 2 кГц величина потерь достигает

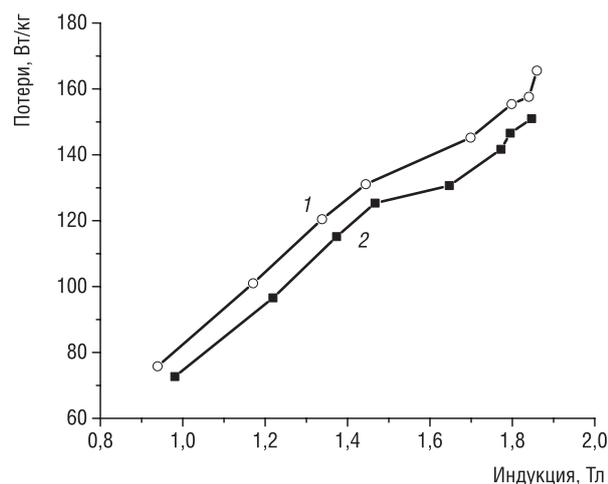


Рис. 6. Потери для низкочастотного композиционного материала на основе ASC 100.29 до отжига (кривая 1) и после отжига в вакууме при 350 °С в течение 3 ч (кривая 2) при перемагничивании по полной петле

Fig. 6. Losses for low-frequency composite material based on ASC 100.29 before annealing (curve 1) and after annealing in vacuum at 350 °С during 3 hours (curve 2) at reversal magnetization in a full loop

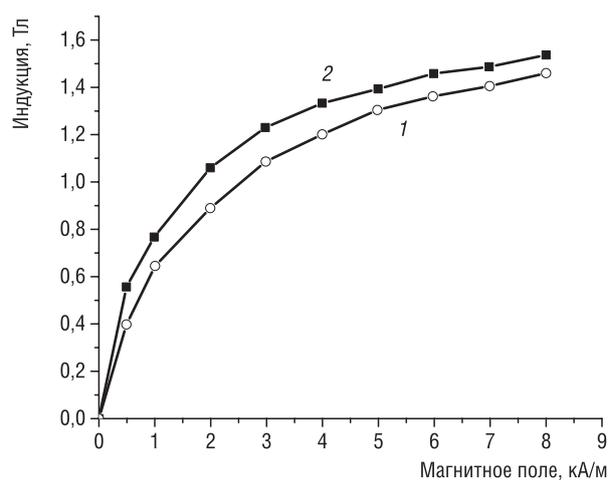


Рис. 7. Зависимости намагничивания  $B = f(H)$  низкочастотного композиционного материала на основе ASC 100.29 до отжига (кривая 1), после отжига в вакууме при 350 °С в течение 3 ч (кривая 2)

Fig. 7. Magnetization dependences  $B = f(H)$  of low-frequency composite material, based on ASC 100.29, before annealing (curve 1) and after annealing in vacuum at 350 °С during 3 hours (curve 2)

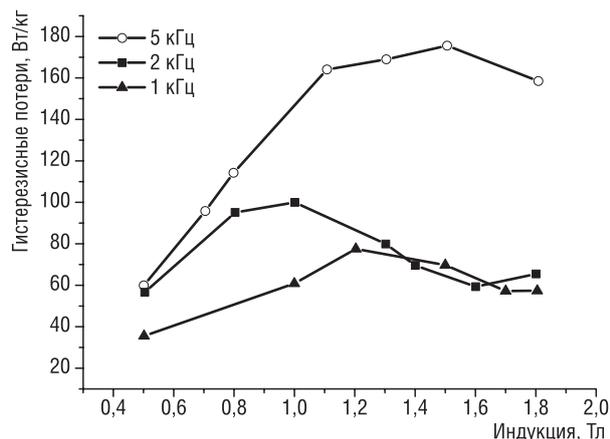


Рис. 8. Зависимость гистерезисных потерь от индукции для полного цикла на частоте перемагничивания 1, 2 и 5 кГц для низкочастотного материала на основе ASC 100.29 с размером зерна  $d > 100$  мкм

Fig. 8. Dependence of hysteresis losses vs. induction for a full cycle at a reversal magnetization frequency of 1, 2, and 5 kHz for a low-frequency material based on ASC 100.29 with grain size  $d > 100$   $\mu\text{m}$

максимума при индукции 1,0–1,2 Тл, далее несколько снижается и остается практически постоянной до индукции 2 Тл, а на частоте 5 кГц потери практически в 2 раза выше. Такая разница в величине гистерезисных потерь, вероятнее всего, обусловлена тем, что исследовались образцы на основе порошков с размером зерна  $d > 100$  мкм. Поэтому такой композиционный материал целесообразно использовать в электротехнических изделиях, работающих на частотах до 1 кГц.

В табл. 2 приведены сравнительные данные по характеристикам различных композиционных материалов на основе железных порошков ASC 100.29 и LiaoNing. Из данных табл. 2 следует, что индукция и потери в материале зависят от типа исходного порошка, его чистоты, плотности сердечников на основе этих материалов и способов обработки (отжига в различных средах).

Т а б л и ц а 2. Сравнение характеристик композиционных материалов на основе железных порошков ASC 100.29 и LiaoNing

Table 2. Comparison of the characteristics of composite materials based on iron powders ASC 100.29 and LiaoNing

Тип железного порошка	Режим отжига	Источник питания для измерения потерь	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$B_{\text{max}}$ , Т	$H_{\text{max}}$ , А/м	$P$ , Вт/м <sup>3</sup>
Порошок Hогanes ASC 100.29 > 100 мкм	Порошок без отжига	DC Power supply PS-305D	7,51	2,12	26600	169
		ИП 01126	7,51	2,09	26200	169
	Порошок без отжига, сердечник без отжига	DC Power supply PS-305D	7,62	1,61	13600	141
		ИП 01126	7,62	1,73	26200	150
	Порошок без отжига, сердечник с отжигом в вакууме	DC Power supply PS-305D	7,62	1,8	12000	713
Порошок с отжигом, сердечник с отжигом в водородной смеси	DC Power supply PS-305D	7,62	1,7	26200	164	
Порошок Hогanes ASC 100.29 < 100 мкм	Порошок без отжига, сердечник без отжига	ИП 01126	7,58	1,57	14800	145
Порошок LiaoNing > 100 мкм	Порошок без отжига, сердечник с отжигом в вакууме	DC Power supply PS-305D	7,42	1,58	26200	147
		DC Power supply PS-305D	7,59	1,34	26200	128
	Порошок без отжига, сердечник без отжига	DC Power supply PS-305D	7,41	1,47	26200	137

**Заключение.** В результате проведенных исследований установлено, что магнитные материалы на основе ASC 100.29 и LiaoNing имеют близкие магнитные характеристики – практически идентичные зависимости  $B = f(H)$ , однако потери на перемагничивание для композиционных материалов на основе порошков ASC 100.29 существенно ниже, чем для LiaoNing, соответственно  $P = 90$  и  $120$  Вт/кг на частоте 1 кГц. Величина гистерезисных потерь линейно увеличивается с ростом внешнего поля, достигая максимума при величине индукции порядка 1 Тл. При дальнейшем увеличении магнитного поля имеет место некоторое уменьшение гистерезисных потерь. Уменьшение толщины изоляционных покрытий приводит к увеличению значения магнитной

индукции при 20 кА/м с  $B_M = 1,7$  Тл до  $B_M = 1,85$  Тл и к соответствующему росту гистерезисных потерь с  $P = 80$  Вт/кг до  $P = 90$  Вт/кг на частоте 1 кГц. Низкочастотный композиционный материал предпочтительно использовать при работе без перемагничивания по частной петле гистерезиса, так как гистерезисные потери в этом случае существенно меньше и соответственно равны  $P = 22$  Вт/кг для частной петли и  $P = 90$  Вт/кг для полной петли на частоте 1 кГц.

### Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований в рамках совместного проекта БРФФИ–Узбекистан № Т19УЗБГ-004.

### Acknowledgements

This work was financially supported by the Belarusian Republican Foundation for Basic Research as part of the joint project BRFFR–Uzbekistan No. T19UZBG-004.

### Список использованных источников

1. Janta, T. PM soft magnetic composition versus electrical sheets / T. Janta, A. Kordecki // *Soft magnetic material workshop, Euro PM*. – Japan, 2000. – P. 15–29
2. Тульчинский, Л. Н. Порошковые магнитомягкие материалы / Л. Н. Тульчинский, А. А. Панасюк // *Порошковая металлургия*. – 1995. – № 7–8. – С. 53–67.
3. Influence of resin type and content on electrical and magnetic properties of soft magnetic composites (SMCs) / M. M. Dias [et al.] // *Powder Technol.* – 2013. – Vol. 237. – P. 213–220. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2013.01.006>
4. Magnetic properties of iron-based soft magnetic composites with SiO<sub>2</sub> coating obtained by reverse microemulsion method / S. Wu [et al.] // *J. Magn. Magn. Mater.* – 2015. – Vol. 381. – P. 451–456. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2015.01.030>
5. Sustarsic, B. SMC Materials in the Design of Small Electric Motors for Domestic Application / B. Sustarsic, A. Sirc, D. Milyavec // *Euro PM 2004: Conference Proceedings PM Functional Materials, 17–21 October 2004*. – Vienna, 2004. – Vol. 4. – P. 629–635.
6. Говор, Г. А. Композиционные магнитно-мягкие материалы на основе порошков железа и перспективы их применения в технике / Г. А. Говор, В. В. Михневич // *Неорганические материалы*. – 2007. – Т. 43, № 7. – С. 805–807.
7. Говор, Г. А. Особенности магнитных характеристик новых композиционных материалов на основе порошков железа / Г. А. Говор, А. К. Вечер, К. И. Янушкевич // *Перспективные материалы и технологии* / под ред. В. В. Клубовича. – Витебск: УО «ВГТУ», 2017. – Т. 2. – С. 278–299.
8. Chasoglou, D. Material Development, PM-Components Powder Manufacturing & Characterization. EPMA Summer School, June 2016. 2 [Electronic resource] / D. Chasoglou. – Mode of access: <https://www.epma.com/document-archive/summer-school-presentations/summer-school-2016/604-powder-manufacturing-characterization/file> – Date of access: 24.02.2020.
9. Dragoshanskii, Yu. N. Combined thermomagnetic and laser treatments of anisotropic electrical materials / Yu. N. Dragoshanskii, V. I. Pudov, V. V. Gubernatorov // *Physics of Metals and Metallography*. – 2011. – Vol. 111, № 5. – P. 464–470. <https://doi.org/10.1134/s0031918x1104003x>

### References

1. Janta T., Kordecki A. PM soft magnetic composition versus electrical sheets. *Soft magnetic material workshop, Euro PM*. Japan, 2000, pp. 15–29.
2. Tulchinskii L. N., Panasiuk A. A. Powder soft magnetic materials. *Poroshkoviaya metallurgiya = Powder Metallurgy*, 1995, no. 7–8, pp. 53–67 (in Russian).
3. Dias M. M., Mozetic H. J., Barboza J. S., Martins R. M., Pelegrini L., Schaeffer L. Influence of resin type and content on electrical and magnetic properties of soft magnetic composites (SMCs). *Powder Technology*, 2013, vol. 237, pp. 213–220. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2013.01.006>
4. Wu S., Sun A., Lu Z., Cheng C., Gao X. Magnetic properties of iron-based soft magnetic composites with SiO<sub>2</sub> coating obtained by reverse microemulsion method. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2015, vol. 381, pp. 451–456. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2015.01.030>
5. Sustarsic B., Sirc A., Milyavec D. SMC Materials in the Design of Small Electric Motors for Domestic Application. *Euro PM 2004: Conference Proceedings PM Functional Materials, 17–21 October 2004. Vol. 4*. Vienna, 2004, pp. 629–635.
6. Govor G. A., Michnevich V. V. Composite soft magnetic materials based on iron powders and prospects for their application in technology. *Neorganicheskiye materialy = Inorganic Materials*, 2007, vol. 43, no. 7, pp. 805–807 (in Russian).
7. Govor G. A., Vechev A. K., Yanushkevich K. I. Features of the magnetic characteristics of new composite materials based on iron powders. Klubovich V. V. (ed.). *Perspektivnye materialy i tekhnologii. T. 2* [Promising Materials and Technologies. Vol. 2]. Vitebsk, 2017, pp. 278–299 (in Russian).
8. Chasoglou D. *Powder Manufacturing & Characterization. EPMA Summer School, June 2016. 2*. Available at: <https://www.epma.com/document-archive/summer-school-presentations/summer-school-2016/604-powder-manufacturing-characterization/file> (accessed 24 February 2020).
9. Dragoshanskii Yu. N., Pudov V. I., Gubernatorov V. V. Combined thermomagnetic and laser treatments of anisotropic electrical materials. *Physics of Metals and Metallography*, 2011, vol. 111, no. 5, pp. 464–470. <https://doi.org/10.1134/s0031918x1104003x>

### Информация об авторах

*Вечер Александр Константинович* – старший научный сотрудник, лаборатория физики магнитных материалов, Научно-практический центр Национальной академии наук по материаловедению (ул. П. Бровка, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: vetcher@physics.by

*Говор Геннадий Антонович* – доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, лаборатория физики магнитных материалов, Научно-практический центр Национальной академии наук по материаловедению (ул. П. Бровка, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: govor@physics.by

*Янушкевич Казимир Иосифович* – доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией физики магнитных материалов, Научно-практический центр Национальной академии наук по материаловедению (ул. П. Бровка, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: kazimir@physics.by

*Бердиев Усан Турдиевич* – кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электрический транспорт и высокоскоростной электроподвижной состав», Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта (ул. Адылходжаева, 1, 100167, Ташкент, Республика Узбекистан). E-mail: berdiev1962@inbox.ru

*Хасанов Фазил Фархад Аглы* – аспирант, ассистент кафедры «Электрический транспорт и высокоскоростной электроподвижной состав», Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта (ул. Адылходжаева, 1, 100167, Ташкент, Республика Узбекистан). E-mail: tashiit\_rektorat@mail.ru

### Information about the authors

*Alexander K. Vetcher* – Senior Researcher, Laboratory of Physics of Magnetic Materials, Scientific and Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: vetcher@physics.by

*Gennady A. Govor* – Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Chief Researcher of Laboratory of Physics of Magnetic Materials, Scientific and Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: govor@physics.by

*Kazimir I. Yanushkevich* – Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Head of the Laboratory of Physics of Magnetic Materials, Scientific and Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kazimir@physics.by

*Usan T. Berdiev* – Ph. D. (Technics), Professor, Head of the Department of Electric Transport and High-Speed Electric Rolling Stock of the Tashkent Institute of Railway Transport Engineers (1, Adylhodzhaev Str., 100167, Tashkent, Republic of Uzbekistan). E-mail: berdiev1962@inbox.ru

*Fazil F. Khasanov* – Graduate Student, Assistant of the Department of Electric Transport and High-Speed Electric Rolling Stock, Tashkent Institute of Railway Transport Engineers (1, Adylkhodzhaev Str., 100167, Tashkent, Republic of Uzbekistan). E-mail: tashiit\_rektorat@mail.ru