

*Сорокин А.М.*

*Главный технолог АО НПО “Магнетон”  
Россия, г. Владимир, asorokin@tdmagneton.ru*

*Кутенов А.В.*

*Главный специалист АО НПО “Магнетон”  
Россия, г. Владимир*

## **ВЛИЯНИЕ ТЕРМОМАГНИТНОЙ ОБРАБОТКИ НА МАГНИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АМОРФНОГО МАГНИТНОГО СПЛАВА**

**$Fe_{88-x}Si_xB_{12}$  ( $x = 1 - 4$ )**

***Аннотация:** В настоящей статье приведены результаты исследований влияния терромагнитной обработки на магнитные характеристики аморфного магнитного сплава  $Fe_{88-x}Si_xB_{12}$  (где  $x = 1 - 4$ ).*

*Установлено, что замена гомогенизирующего отжига на терромагнитную обработку позволяет не только повысить индукцию насыщения  $B_s$  и максимальную проницаемость  $\mu_{max}$  почти на 5%, но и снизить коэрцитивную силу  $H_c$  почти в 1,5 раза.*

***Ключевые слова:** Аморфные магнитные сплавы Fe-Si-B, магнитные параметры, терромагнитная обработка.*

***Annotation:** This article presents the results of research on the possibility of using hydrogen embrittlement technology in the production of permanent magnets based on the Pr-Fe-B alloy. It has been found that the use of hydrogen embrittlement allows not only to reduce the duration of the grinding operation by more than 1.5 times, but also to reduce the content of Rh oxides in powders by almost 2.5 times and, as a result, to increase the magnetic parameters of manufactured magnets by 8–10%.*

*Key words: Amorphous magnetic alloys Fe-Si-B, magnetic parameters, thermomagnetic treatment.*

В настоящее время аморфные магнитные сплавы (АМС) на основе железа широко используются в электротехнике в качестве магнитомягких материалов для изготовления магнитопроводов высокочастотных дросселей, трансформаторов, слаботочных реле и т.д. [1]. При этом разнообразие химических составов данных материалов позволяет получать практически любое сочетание магнитных параметров, необходимых для оптимального решения конкретной технической задачи.

В данной статье приведены результаты исследований влияния термомагнитной обработки на магнитные характеристики АМС  $Fe_{88-x}Si_xB_{12}$  (где  $x = 1 - 4$ ).

В качестве исходных материалов для выплавки сплавов  $Fe_{88-x}Si_xB_{12}$  использовали железо карбонильное ОСЧ-6, кремний Кр0 и бор кристаллический марки А. Карбонильное железо дополнительно подвергли вакуумному переплаву в индукционной печи ИСВ-0,04 с добавкой твердого окислителя (оксида железа (III)). После переплава содержание углерода в карбонильном железе составляло менее 0,01 масс. %. Кремний и бор вводился в сплав в виде силицида железа  $Fe_2Si$  и бориды железа  $Fe_2B$ , которые получали вакуумной плавкой соответствующего элемента и очищенного карбонильного железа. Выплавку всех сплавов проводили в тиглях из нитрида бора, рекомендованных в [2].

Аморфные магнитные материалы из выплавленных сплавов были получены методом спиннингования на установке “Кристаллизатор 702” в виде лент шириной 12 мм и толщиной 30-40 мкм. Температура разлива расплава поддерживалась на уровне  $1300 \pm 5^\circ C$ . Температуру начала кристаллизации ( $T_k$ ) АМС определяли на установке термического анализа STA449F3 Jupiter. Процесс кристаллизации всех исследованных АМС начинался при

температуре 435 – 445°С и заканчивается при температуре 450 – 460°С, поэтому температура гомогенизирующего отжига в соответствии с рекомендациями [3] была установлена на 10% ниже температуры начала кристаллизации и составила 400°С.

Гомогенизирующий отжиг всех АМС проводили в вакуумной печи СНВЭ-1.3.1 в течение 2 часов. Скорость нагрева и охлаждения составляла 50°С/мин. В процессе отжига глубина вакуума в рабочей камере печи составляла не более 0,01 Па. На отожженных образцах определяли магнитные параметры: индукцию насыщения  $B_s$ , максимальную проницаемость  $\mu_{\max}$  и коэрцитивную силу  $H_c$ . Определение магнитных параметров проводили на установке “Permagraph С-300” по методике [4].

На рисунках 1 – 3 представлены результаты определения магнитных параметров образцов АМС после гомогенизирующего отжига. Как видно из приведенных результатов, АМС состава  $Fe_{87}Si_1B_{12}$  практически имеет уровень намагниченности насыщения свойственный кремнистым электротехническим сталям, которые обычно используют для изготовления элементов магнитопроводов электронных устройств [5]. При этом его максимальная магнитная проницаемость почти в 5 раз выше.

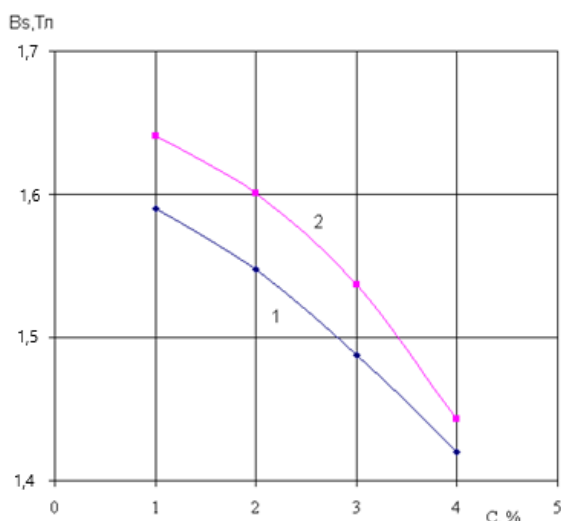


Рисунок 1. Зависимость индукции насыщения ( $B_s$ ) АМС  $Fe_{88-x}Si_xB_{12}$  от содержания кремния ( $C$ ): 1 – отжиг при 400°С; 2 – ТМО при 400°С

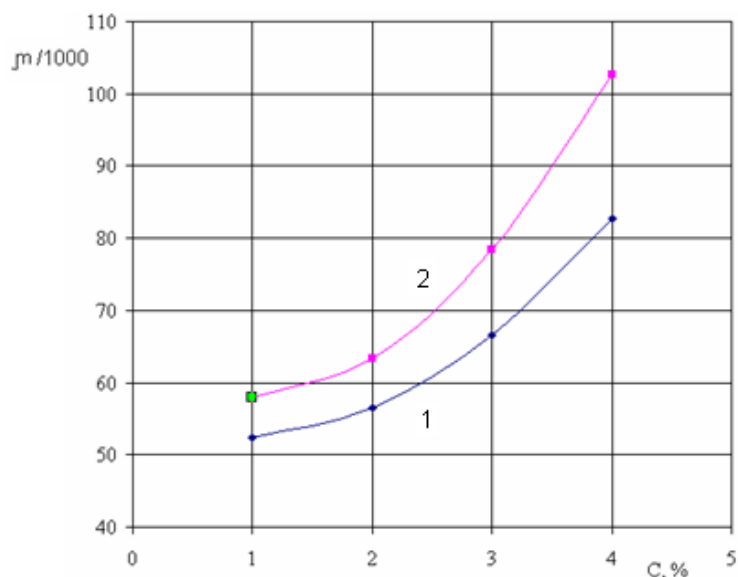


Рисунок 2. Зависимость максимальной магнитной проницаемости ( $\mu_{\max}$ )

АМС Fe88-xSixB12 от содержания кремния (C):

1 – отжиг при 400°C; 2 – ТМО при 400°C

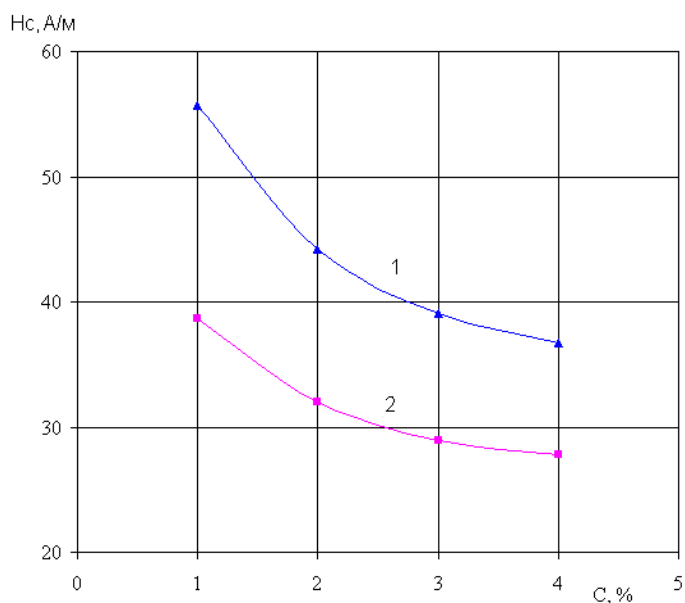


Рисунок 3. Зависимость коэрцитивной силы ( $H_c$ ) АМС Fe88-xSixB12 от содержания кремния (C): 1 – отжиг при 400°C; 2 – ТМО при 400°C

Единственным недостатком АМС состава Fe<sub>87</sub>Si<sub>1</sub>B<sub>12</sub> является высокая коэрцитивная сила  $H_c$ , которая почти на 40% выше, чем у кремнистых

электротехнических сталей, что определяет в нем и более высокие потери магнитного потока в переменных электрических полях [5].

С учетом того, что дальнейшее снижение содержания кремния в АМС, хотя и приведет к росту намагниченности насыщения, вызовет еще большее увеличение коэрцитивной силы  $H_c$ , то единственным способом дальнейшей оптимизации магнитной структуры материала остается проведение термомагнитной обработки (ТМО) вместо гомогенизирующего отжига. Так как известно, что ТМО лент АМС в переменном магнитном поле не только повышает намагниченность насыщения в результате роста степени магнитной анизотропии доменов, но и снижает коэрцитивную силу АМС за счет роста числа дефектов на их границах [6].

Для проведения ТМО использовалась изотермическая вакуумная двухполюсная установка ЕАЖИ.51.014.00.000 с напряженностью знакопеременного магнитного поля в рабочем зазоре 150 кА/м и частотой его изменения 50 Гц. Температурный режим ТМО полностью соответствовал режиму гомогенизирующего отжига: выдержка 2 часа при 400°C. Глубина вакуума в процессе ТМО составляла не более 0,1 Па. Образцы размещались в установке так, что бы направление вектора индукции магнитного поля было расположено вдоль длины ленты АМС.

Результаты исследования магнитных параметров образцов АМС после ТМО также приведены на рисунках 1 – 3. Как видно из рисунков замена гомогенизирующего отжига на ТМО позволяет повысить индукцию насыщения  $B_s$  и максимальную проницаемость  $\mu_{\max}$  АМС  $Fe_{87}Si_1B_{12}$  почти на 5%. При этом коэрцитивная сила  $H_c$  образцов снижается почти в 1,5 раза.

В соответствии с комплексом демонстрируемых магнитных параметров АМС  $Fe_{87}Si_1B_{12}$  может быть использован при изготовлении магнитопроводов, работающих в условиях одновременного воздействия высоких статических магнитных и высокочастотных электрических полей, например, полюсных наконечников низкопольных магнитно-резонансных томографов.

Работа выполнена в рамках договора между НИТУ «МИСИС» (г.Москва) и АО НПО «Магнетон» (г. Владимир) от «27» сентября 2017 года о софинансировании и дальнейшем использовании результатов проекта по теме: «Разработка технологии получения магнитотвердых магнитных материалов и магнитных систем на их основе для нового поколения низкочастотных МРТ».

### Список литературы

1. Jiao, J. The Use of Eutectic Fe-Si-B Alloy as a Phase Change Material in Thermal Energy Storage Systems / J. Jiao, B. Gyorud, C. Sindland, J.Safarian, K.Tang, K. Sellevoll, M. Tangstad //Materials. – 2019. – V.12. – P. 2312.

2 Jiao, J. Wettability of molten Fe–Si–B alloy on graphite, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, and h-BN substrates / J. Jiao, B. Gyorud, J. Safarian, M. Tangstad // Proceedings of the Liquid Metal Processing and Casting Conference, 2019. – P. 1 – 9.

3. Кекало, И.Б. Процессы структурной релаксации и физические свойства аморфных сплавов / И.Б. Кекало.- М.: Изд. Дом «МИСиС», 2014. – Т1. – 436 с.

4. Churyukanova, M. Non-contact method for stress monitoring based on stress dependence of magnetic properties of Fe-based microwires / M. Churyukanova, S. Kaloshkina, E. Shuvaeva, A. Stepashkina, M. Zhdanova, A. Aronin, O. Aksenov, P. Arakelov, V. Zhukov, A. Zhukov // Journal of Alloys and Compounds. – 2018. – V. 748. – P. 199-205.

5. Казаджан, В. Д. Магнитные свойства электротехнических сталей и сплавов / В. Д. Казаджан, Л. Б Дурнева. – М.: ООО «Наука и технологии», 2000. – 224 с.

6. Потапов, А.И. Физическое обоснование и реализация методов направленного воздействия на функциональные свойства магнитомягких аморфных и нанокристаллических материалов: дис. д-ра физ.-мат. наук: 01.04.11 / А. И. Потапов. – Екатеринбург: ИФМ УРО РАН, 2009. – 306 с.

