

УДК 66-963

DOI: 10.17223/00213411/64/2-2/178

*А.Э. ШРАЙНЕР, А.С. БУЙНОВСКИЙ, Е.Ю. КАРТАШОВ, В.Л. СОФРОНОВ, В.М. БРОДСКИЙ***ПРИМЕНЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИ АКТИВИРОВАННЫХ ПОРОШКОВ В ПРОЦЕССЕ ПОЛУЧЕНИЯ МАГНИТОВ Nd–Fe–B**

Представлены результаты исследований по получению высокоэнергетических постоянных магнитов на основе редкоземельных металлов типа Nd–Fe–B из материалов, полученных в процессе индукционного переплава с добавлением механически активированных порошков. При этом рассмотрено влияние количества и вида механически активированных порошков на основные характеристики полученных магнитов.

**Ключевые слова:** магниты Nd–Fe–B, механически активированные порошки, индукционный переплав, гидрирование.

Высокоэнергетические магниты на основе редкоземельных металлов (РЗМ) становятся все более востребованы в современном мире благодаря их уникальным свойствам: небольшие массогабаритные размеры, высокие магнитные характеристики и качество продукта [1].

В настоящее время основным способом получения таких магнитов является метод порошковой металлургии, который представляет собой многостадийный процесс [2]. В работе рассмотрена усовершенствованная технология их получения, которая позволяет сократить число операций и существенно снизить количество получающихся отходов и тем самым увеличить выход готовой продукции. Принципиальная технологическая схема получения магнитов с применением механически активированных порошков представлена на рис. 1.

Отличия данной технологии от классического метода порошковой металлургии заключаются в следующем:

- использование индукционного переплава слитков высоконеодимовых лигатур с добавлением механически активированного модификатора с целью получения мелкокристаллической структуры отливки во всем ее объеме;
- исключение операций фторирования и восстановления при получении сплавов с использованием металлического неодима;
- возможность добавки к порошкам гидридов полученных сплавов на основе Nd–Fe–B требуемых количеств порошков ферробора и металлического Fe до стехиометрии тройного сплава с их последующим измельчением в шаровых мельницах в процессе твердофазного легирования (ТФЛ);
- возможность ТФЛ порошков гидридов сплава Nd–Fe–B порошками гидридов, содержащих Dy, Tb и другие металлы.

Процессы изготовления гидридов металлов и сплавов в настоящий момент достаточно подробно исследованы и описаны в литературе, а операции, следующие за ними, находят применение в существующей технологии получения постоянных магнитов [3]. Использование способа индукционного переплава сплавов и лигатур с добавлением механоактивированных нанодисперсных модификаторов для получения мелкокристаллической структуры, состоящей из кристаллов  $Nd_2Fe_{14}B$ , размерами не более 10 мкм, т.е. размеров доменов магнитных материалов, является новой и актуальной задачей. Исследования процесса гидрирования высоконеодимовых модифицированных лигатур продемонстрировали, что гидрирование материала проходит по границам зерен, которые являются обогащенными по неодиму. Поэтому при смешивании полученных таким образом гидридов с порошками металлического железа и ферробора в процессе ТФЛ происходят следующие спекание, рекомбинация гидридов и образование кристаллов  $Nd_2Fe_{14}B$  с размерами доменов 5–10 мкм.

При получении лигатур и магнитных сплавов фторидным способом или с применением индукционного переплава кристаллизация имеет направленный характер от холодных поверхностей футерованного тигля или изложницы к центру [4].

Причем получающиеся при этом кристаллы имеют размеры, значительно превышающие размеры доменов. При гидрировании такого материала он рассыпается на пластинки и чешуйки, которые следует дополнительно истирать механически. Известно, что для получения мелкокристал-

лической (5–10 мкм) структуры получаемых сплавов необходимо выполнение одного из двух условий: либо скорость охлаждения отливки должна быть выше  $10^4$  К/мин, либо кристаллизация должна проходить не от стенок, а непосредственно в объеме металла [5]. Первое условие технологически сложно осуществить, поэтому для обеспечения второго условия нами был использован метод добавки искусственных центров кристаллизации в виде ультрананодисперсных механоактивированных порошков, который зарекомендовал себя при производстве чугунов [6].

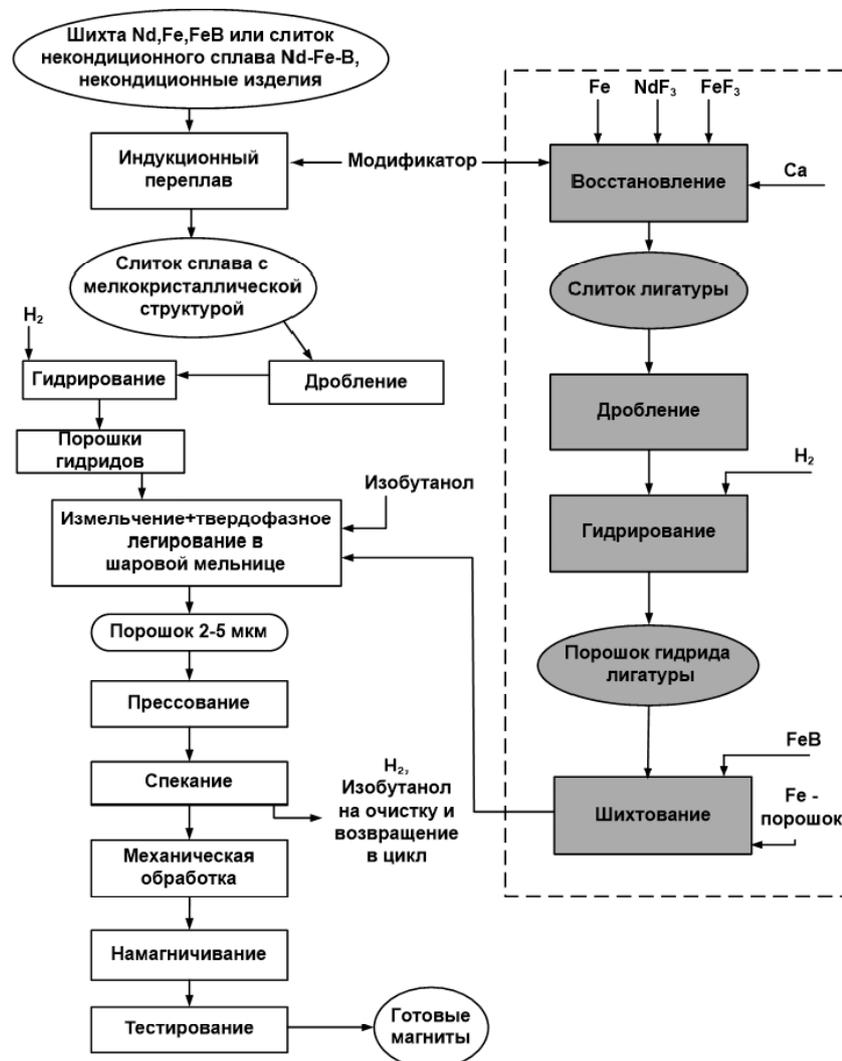


Рис. 1. Принципиальная технологическая схема получения магнитов

В работе приведены результаты исследований по получению магнитных сплавов на основе системы Nd-Fe-B с мелкокристаллической структурой, полученных при добавлении высоконеодимовых модифицированных лигатур, а также постоянных магнитов из них. Исследования по получению сплавов и лигатур проводили на индукционной установке УППФ-3М со сливом расплава металла в кристаллизатор через воронку и шлакоулавнитель. Для обеспечения объемной кристаллизации расплава высоконеодимовой лигатуры перед сливом металла в кристаллизатор добавляли механоактивированный модификатор, состоящий из оксидов РЗЭ, плакированных железом, размером 0,5 мкм. Модификатор является поверхностно-активным веществом, обеспечивающим появление активных центров кристаллизации во всем объеме расплава. Благодаря этому удалось создать одинаковую микроструктуру в объеме слитка и облегчить дальнейший процесс его гидрирования.

Получившийся слиток далее раздробили на прессе, отшлифовали образец из центра слитка и исследовали его на электронном микроскопе марки Philips SEM 515. Полученные результаты анализов образцов высоконеодимовой (70–75% Nd) лигатуры представлены на рис. 2.

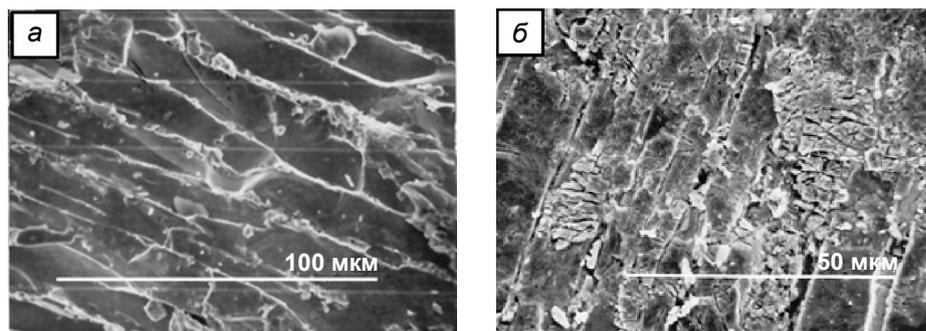


Рис. 2. Микрофотографии скола высоконеодимовой лигатуры: *а* – без модификатора, *б* – с модификатором

Как видно из микрофотографий, поверхность модифицированной лигатуры выглядит более «рыхлой», с меньшим размером зерен (0.1–1.0 мкм), т.е. имеет более разветвленную поверхность контакта. Благодаря этому гидрирование такой лигатуры будет проходить интенсивнее, чем гидрирование лигатуры, полученной путем индукционного переплава материалов без добавления модификатора. Время реагирования с водородом уменьшается на 25–30 %, что влияет на общее время изготовления магнитов и, в конечном итоге, на общую себестоимость продукта.

При получении магнитных сплавов Nd–Fe–В из высоконеодимовой лигатуры с использованием модификатора и без его добавления установили, что первые слитки обладают более высокой хрупкостью при их измельчении.

В таблице представлены магнитные характеристики образцов постоянных магнитов, полученных по методу порошковой металлургии из слитков магнитных сплавов с добавлением и без добавления модификатора.

#### Сравнение свойств полученных постоянных магнитов Nd–Fe–В

№ опыта	Количество модификатора, %/г	Время измельчения сплава, мин	Магнитные характеристики		Состояние изложницы (кристаллизатора)
			$B_r$ , Тл	$H_{сц}$ , кЭ	
1	Без модификатора	36	1.10	4.75	Горячая ( $t = 200$ °С)
2	0.05 / 11.4	30	1.19	5.50	Холодная ( $t = 25$ °С)
		36	1.19	5.75	
		42	1.19	6.00	
3	0.10 / 22.8	30	1.25	6.00	Горячая ( $t = 200$ °С)
		36	1.25	6.50	
		42	1.25	6.75	

Пр и м е ч а н и е.  $B_r$  – магнитная индукция, Тл;  $H_{сц}$  – коэрцитивная сила по намагниченности, кЭ; погрешность измерения приборов  $\pm 0.5\%$ .

Из таблицы видно, что при добавлении даже небольшого количества модификатора магнитные свойства полученных образцов магнитов улучшаются. Добавка 0.05–0.01% модификатора позволила увеличить магнитную индукцию на 0.09–0.15 Тл (8–14%), а коэрцитивную силу по намагниченности – на 0.75–2.00 кЭ (15–42%). Причем с увеличением количества введенного модификатора магнитные характеристики возрастают.

Следует отметить, что требуется проведение дополнительных исследований по установлению механизма влияния механоактивированных добавок на процесс кристаллизации расплава металла во всем объеме, а также определения оптимальных условий для достижения наибольшей эффективности по увеличению магнитных характеристик постоянных магнитов.

Таким образом, проведенные исследования показали, что магниты, химический состав сплава которых был скорректирован с применением гидридов, полученных из модифицированных высоконеодимовых лигатур, обладают более высокими магнитными свойствами по сравнению с магнитами, которые получены по классической технологии порошковой металлургии.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буйновский А.С., Софронов В.Л., Макашеев Ю.Н. и др. // *Металлы*. – 1996. – № 2.
2. Петров И.М. // *Актуальные вопросы получения и применения РЗМ-2015: сб. материалов Междунар. науч.-практич. конф., Москва, 25 июня 2015 г. – 2015.* – С. 13–15.
3. Шумкин С.С., Прокофьев П.А., Семенов М.Ю. и др. // *Металлург*. – 2019. – № 5. – С. 37–42.
4. Карташов Е.Ю. *Технология измельчения РЗМ-содержащих лигатур методом гидрирования: дис. ... к.т.н. – Северск: СГТА, 2006.* – 157 с.
5. Пикунов М.В., Беляев И.В., Сидоров Е.В. *Кристаллизация сплавов и направленное затверждение отливок.* – Владимир: Владим. гос. ун-т, 2002. – 214 с.
6. Полубояров В.А. и др. *Способ модифицирования чугунов и сталей // Патент РФ № 2121510 по заявке № 96122580/02. Оpubл. 10.11.1998. Бюл. № 31.*

Поступила в редакцию 20.10.2020.

Северский технологический институт Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Северск, Россия

**Шрайнер** Артур Эдуардович, аспирант СТИ НИЯУ «МИФИ», e-mail: Artshrayner@gmail.com;  
**Буйновский** Александр Сергеевич, д.т.н., профессор СТИ НИЯУ «МИФИ», e-mail: Asbujnovskij@mail.ru;  
**Карташов** Евгений Юрьевич, к.т.н., доцент СТИ НИЯУ «МИФИ», e-mail: Kart.62@yandex.ru;  
**Софронов** Владимир Леонидович, д.т.н., профессор СТИ НИЯУ «МИФИ», e-mail: VLSofronov@mephi.ru;  
**Бродский** Владимир Маркович, к.т.н., доцент СТИ НИЯУ «МИФИ», e-mail: lamansh2006@yandex.ru.

*A.E. SHRAYNER, A.S. BUINOVSKIY, E.U. KARTASHOV, V.L. SOFRONOV, V.M. BRODSKIY*

## APPLICATION OF MECHANICALLY ACTIVATED POWDERS IN THE PRODUCTION OF Nd-Fe-B MAGNETS

The results of research on the production of high-energy permanent magnets based on rare-earth metals such as Nd-Fe-B from materials obtained in the process of induction remelting with the addition of mechanically activated powders are presented. The influence of the amount and type of mechanically activated powders on the main characteristics of the obtained magnets is considered.

**Keywords:** Nd-Fe-B magnets, mechanically activated powders, induction remelting, hydrogenation.

Seversk Technological Institute National Research Nuclear University «МЕРФИ», Seversk, Russia

**Shrayner** Artur Eduardovich, Graduate Student STI NRNU «МЕРФИ», e-mail: Artshrayner@gmail.com;  
**Buinovskiy** Alexander Sergeevich, Doctor of Technical Sciences, Professor STI NRNU «МЕРФИ», e-mail: Asbujnovskij@mail.ru;  
**Kartashov** Evgeny Yurievich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor STI NRNU «МЕРФИ», e-mail: Kart.62@yandex.ru;  
**Sofronov** Vladimir Leonidovich, Doctor of Technical Sciences, Professor STI NRNU «МЕРФИ», e-mail: VLSofronov@mephi.ru;  
**Brodskiy** Vladimir Markovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor STI NRNU «МЕРФИ», e-mail: lamansh2006@yandex.ru.