**Исследование влияния времени и среды размола на магнитные свойства анизотропных порошков Nd-Fe-B, полученных методом HDDR**

**Иванов И.А.1, *Голубятникова А.А.*1**

1студент

Уральский федеральный университет имени первого президента России Б.Н. Ельцина, ИЕНиМ, кафедра магнетизма и магнитных наноматериалов, Екатеринбург, РоссияE–mail: ilya.ivanov@urfu.ru

Процесс hydrogenation-disproportionation-desorption-recombination (HDDR) был открыт в 1989 г. японцами Такешитой и Накаямой, экспериментировавшими с гидрированием (*p* = 100 кПа) сплава Nd-Fe-B в области высоких температур (700 ℃ – 900 ℃) [1]. На данный момент различные модификации данной технологии рассматриваются как эффективный способ «чистой» переработки отработавших постоянных магнитов и получения высококоэрцитивных порошков [2, 3].

В основе процесса лежит термодинамическая нестабильности гидрида Nd2Fe14BH*x* в области температур *T* > 650 ℃ [2, 3], где становится возможной диффузия тяжелых атомов на длинные (относительно межатомных) расстояния, в силу чего происходит распад (диспропорционирование) на более стабильные в данных условиях фазы:

 (1)

где *x* – параметр, определяющийся условиями проведения процесса (температура и давление водорода), фактически, характеризирует атомное процентное содержание водорода в междоузлиях решётки Nd (твёрдый раствор внедрения); Δ*H* – изменение энтальпии. Причём реакция поглощения водорода из-за расширения кристаллических решёток сопровождается растрескиванием исходного сплава до состояния близкого к порошкообразному [2].

В ходе обратной реакции, при вакуумировании системы, происходит десорбция водорода, в результате чего рекомбинирует фаза Nd2Fe14B. Образующиеся порошинки представляют из себя кластеры: субмикронные и наноразмерные зёрна основной фазы (~ 0,3 мкм), разделённые между собой тонкой (~ 2 нм) Nd‑обогащённой парамагнитной прослойкой, обеспечивающей их магнитную изоляцию [2, 3]. Для получения анизотропных порошков реакцию (1) проводят в термодинамически неравновесных условиях [2], что способствует сохранению метастабильных наноразмерных зародышей основной фазы.

В данной работе установлены зависимости магнитных свойств HDDR-порошков от времени и среды размола (этиловый спирт, химически чистый ацетон, гексан). В качестве сырья используется сплав Nd-Fe-B с 33 % масс. Nd, гомогенизированный при температуре 1000 ℃ в течение 24 часов. Гидрирование проводится по методу s-HDDR [2], позволяющему получать анизотропные порошки без излишнего охрупчивания исходного сплава. Параметры процесса подобраны эмпирически. Измерение предельных петель магнитного гистерезиса производилось на измерительном комплекс РРМS DynaCool, оборудованным модулем VSM, в магнитном поле *H =* 90 кЭ.

Показано, что вид жидкости, в которой проводились размолы, не оказывает принципиального влияния на величину коэрцитивной силы.

Показано, что, в отличии от бысторазакалённых сплавов Nd-Fe-B, для HDDR‑порошков характерно резкое снижение коэрцитивной силы с увеличением времени размола. Данный факт частично может быть объяснён накоплением поверхностных дефектов, нанесением сколов, повышением шероховатости зёрен, однако, при этом, открытым остаётся вопрос о механизмах перемагничивания HDDR‑порошков, изучение которых станет продолжением этой работы.

За помощь в проведении исследований и интерпретацию их результатов авторы выражают благодарность доц. кафедры магнетизма и магнитных наноматериалов ИЕНиМ УрФУ, к. ф.‑м. н. Волегову А.С., с.н.с. лаборатории ферромагнитных сплавов ИФМ УрО РАН, к. ф.-м.н. Протасову А.В., а также с.н.с. отдела магнетизма твёрдых тел НИИ ФПМ ИЕНиМ УрФУ Андрееву С.В.

**Литература**

1. T. Takeshita and R. Nakayama, “Magnetic properties and microstructures of the NdFeB magnet powder produced by hydrogen treatment,” Proceedings of the 10th International Workshop on Rare-Earth Magnets and Their Applications, Kyoto, Japan, pp. 551, 1989.
2. Poenaru I. et al. HDDR as advanced processing method and recycling technology to address the rare-earth resource criticality in high performance Nd2Fe14B magnets production //Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2023. – С. 170777.
3. Habibzadeh A., Kucuker M. A., Gökelma M. Review on the Parameters of Recycling NdFeB Magnets via a Hydrogenation Process //ACS omega. – 2023.