

УДК 621.436.038

*А.Н. Врублевский, канд. техн. наук, А.М. Бовда, инж., А.В. Денисов, инж.*

## РАЗРАБОТКА МАГНИТОСТРИКЦИОННОГО ПРИВОДА ДЛЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ДИЗЕЛЬНОЙ ФОРСУНКИ

### Введение

Проблема разработки эффективного привода форсунки для дизельной топливной аппаратуры с электронным управлением является актуальной. Поскольку серийно выпускающиеся в данное время приводы – электромагниты и пьезоактюаторы – имеют ряд недостатков, преодолеть которые практически невозможно. Альтернативой указанным выше решениям может стать использование в качестве привода иглы форсунки материалов с магнитострикционным эффектом. Термин «магнитострикция» дословно обозначает магнитное сокращение ферромагнитного материала. Линейную магнитострикцию – коэффициент магнитострикции  $\lambda$  – можно представить как относительное изменение длины материала:

$$\lambda = \frac{\Delta l}{l},$$

где  $\Delta l$  – изменение длины материала под действием магнитного поля;

$l$  – равновесная длина материала.

### 1. Анализ публикаций

Обычно, изменение длины ферромагнитного материала под действием магнитного поля считают нежелательным эффектом. Поэтому изготовители стараются получить в ферромагнитных сплавах минимальное проявление эффекта магнитострикции. Вместе с тем в последнее время для технического применения в различных областях был разработан целый ряд соединений, проявляющих «гигантскую магнитострикцию» [1, 2]. Самой значительной разработкой в данном отношении является создание интерметаллического соединения под промышленной маркой Terfenol-D [1].

Данный материал способен в магнитном поле напряженностью  $H = 40$  кА/м изменять свою длину на 10 мкм при  $l = 10$  мм. То-есть коэффициент магнитострикции  $\lambda$  равен  $10^{-3}$ . В данном интерметаллическом соединении около 50 % магнитной энергии преобразовывается в механическую [1]. Terfenol-D содержит два редкоземельных элемента, тербий (Tb) и диспрозий (Dy). В элементарной форме оба материала проявляют эффект магнитострикции при температурах ниже 0 °С. Соединение данных элементов в отношении 2:1 с третьим – железом (Fe) повышает температуру точки Кюри до 377 °С. Tb имеет более высокую магнитострикцию чем Dy, но он проявляет большую анизотропию и, следовательно Tb более трудно намагнитить, требуя больших магнитных полей. Соединение с Dy, который имеет противоположную анизотропию, позволяет уменьшить напряженность магнитного поля до значений, практически реализуемых в технике. Улучшить магнитострикционные свойства материала возможно изменив исходную стехиометрическую форму Tb<sub>0,3</sub>Dy<sub>0,7</sub>Fe<sub>2,0</sub> либо увеличением доли Tb, либо уменьшением количество железа [3].

Верхний предел прочности соединения при одноосном сжатии равен 350 МПа. Эффект магнитострикции можно использовать в приводах с высокими частотами срабатывания и удельной энергией. На рис. 1 показана эффективность применения материала Terfenol-D для исполнительного устройства форсунки. Диапазон рабочих частот Terfenol-D – от 10 до 10000 Гц, что значительно (в 2 ... 3 раза) превосходит такие приводы, как соленоид, гидропривод, сервомеханические актюаторы (СМП) и несколько уступает пьезокерамическим приводам. Величина удельной

энергии Terfenol-D в рабочем диапазоне изменяется от 50 до 120 МДж/м<sup>3</sup>.

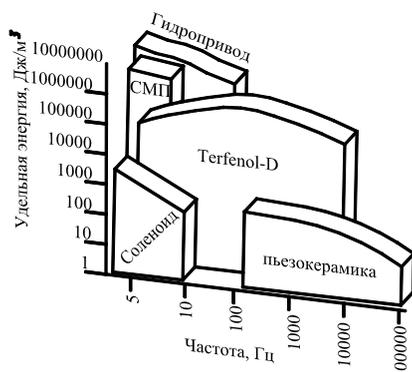


Рис. 1. Сравнение параметров возможных исполнительных устройств для форсунки двигателя

Приведенные данные свидетельствуют о том, что Terfenol-D является наиболее мощным материалом, развивающим высокую деформацию и силу в широком диапазоне частот при быстродействии порядка микросекунды.

## 2. Цель и постановка задачи

С целью создания эффективного привода дизельной форсунки с использованием материала с "гигантской магнитострикцией" в данной работе поставлена задача – разработать основы способа использования Terfenol-D для привода дизельной форсунки.

## 3. Решение задачи.

### 3.1. Получение соединения Terfenol-D

Для изготовления исходных слитков использовали металлы Tb и Dy чистотой 99,8% и карбонильное железо прошедшее термическую обработку в вакууме не ниже  $1 \cdot 10^{-5}$  мм рт. ст. при температуре 1400 °С в течении 10 часов. Сплавы получали сплавлением исходных компонентов в дуговой печи с нерасходуемым вольфрамовым электродом. Для обеспечения однородности слитка проводили трехкратный переплав с переворачиванием слитка. Для получения столбчатой структуры кристаллизацию расплава проводили в условиях направленного отвода тепла организованного в медном водоохлаждаемом кристаллизаторе. Термиче-

ская обработка слитков проводилась в вакууме при температуре  $T=900$  °С на протяжении 4 часов. Скорость нагрева образцов составляла 200 °С/час, остывание образцов производилось с печкой.

На рис. 2 приведена микроструктура исходного сплава. Согласно металлографическим исследованиям микроструктура состоит из основной фазы со структурой типа фазы Лавеса и фазы обогащенной редкоземельными элементами, расположенной по границам зерен матричной фазы в виде очень тонких прослоек.

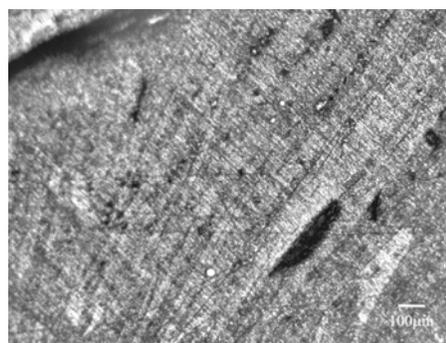


Рис. 2. Структура сплава Terfenol-D

Направление зерен основной фазы носит явно выраженный ориентационный характер, что связано с направлением температурного градиента при охлаждении образца. Термическая обработка сплава при  $T=900$ °С на протяжении 4 часов (см. рис. 3) приводит к ре-абсорбции избытка редкоземельной прослойки в матричную фазу, приводя к систематическому уменьшению и перераспределению фазы обогащенной редкоземельными элементами, что оказывает существенное влияние на величину продольной магнитострикции насыщения  $(\lambda_s)_D$ . Такое влияние термической обработки на микроструктуру сплава можно интерпретировать на основании существования небольшой области растворимости фазы обогащенной редкоземельными элементами в матричной фазе стехиометрического состава [4].



Рис. 3. Структура сплава Terfenol-D после термической обработки  $T=900^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau=4$  часа

### 3.2. Способ изготовления "Терфенопласта"

Для магнитоотрицательного привода использовать полученный сплав после термообработки не представляется возможным из-за его низкой пластичности и хаотичной направленности структуры основной фазы. Упорядочить структуру и получить максимальную величину продольной магнитоотрицательности представляется возможным при внедрении частиц сплава Terfenol-D в матрицу из пластичного материала обладающего диамагнитными свойствами. Так, в [5] предложены соединения Terfenol-D с металлическими матрицами алюминия, меди, железа, магния или никеля. В этих соединениях, коэффициент  $\lambda$  равен приблизительно объемной доли магнитоотрицательной фазы. Например, соединение, содержащее 50%-ый Terfenol-D имеет магнитоотрицательный коэффициент в два раза меньше, чем Terfenol-D.

Как показано в [6], увеличить значение коэффициента магнитоотрицательности возможно используя для Terfenol-D матрицу эпоксидной смолы. В данном случае  $\lambda$ , не прямо пропорциональна содержанию в компаунде Terfenol-D, а частично зависит от эластичных свойств матричного материала, и, в частности для соединений Terfenol-D/Эпоху, большая магнитоотрицательность, может быть получена при более низкой, (около 50%) объемной доли Terfenol-D.

Использование эпоксидной смолы в качестве матрицы вполне приемлемо при создании магнитоотрицательного привода, работающего в условиях дизельной форсунки.

Нами разработана технология изготовления компаунда "Терфенопласт". В состав "Терфенопласта" входят в определенном объемном отношении частицы сплава Terfenol-D размером 200...400 мкм и эпоксидная модифицированная смола. До отверждения эпоксидной смолы распределенные частицы Terfenol-D ориентированы в присутствии магнитного поля. Для изготовленных цилиндрических образцов (рис. 4) ось намагничивания совпадает с осью цилиндра.



Рис. 4. Общий вид "Терфенопласта"

### 3.3. Измерение магнитоотрицательности

Магнитоотрицательность полученных образцов определялась при помощи специально сконструированного стенда схема которого представлена на рис. 5. Исследуемый образец 7, заряженный в немагнитную обойму 6, помещался на неподвижную опору 8 в центр магнитного поля, получаемого в катушке 9. Посредством немагнитного штока 5, толкателя 4 и стойки 3 удлинение магнитоотрицателя под действием магнитного поля фиксировалось микрометром 1 с ценой деления 1 мкм. Дополнительно в измерительной цепи предусмотрена возможность задания с помощью пружины 2 предварительного сжимающего напряжения.

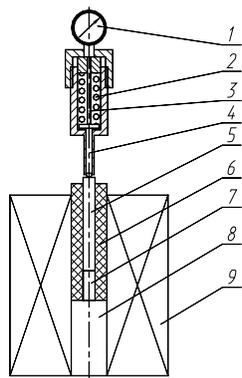


Рис. 5. Стенд для измерения магнитострикции

Представленные на рис. 6 результаты измерений свидетельствуют о зависимости коэффициента  $\lambda$  от структуры Terfenol-D входящего в компаунд "Терфенолпласт". Так, частицы сплава Terfenol-D после термической обработки (рис. 3), описанной в п. 3.1, позволяют повысить  $\lambda$  "Терфенолпласта" в 2 раза. При этом значение  $\lambda = 0,32 \times 10^{-3}$  получено при напряженности магнитного поля 45 кА/м.

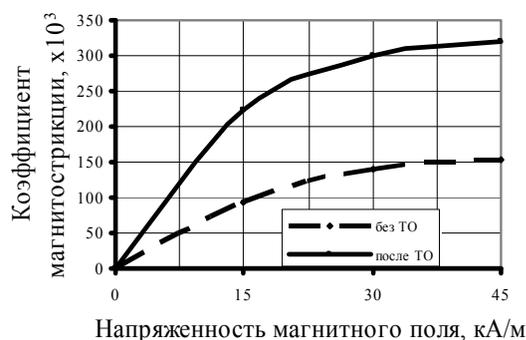


Рис. 6. Зависимость  $\lambda$  от напряженности магнитного поля для Терфенолопласта до и после термической обработки Terfenol-D

### Заключение

Обоснован и предложен способ получения активного материала магнитостриктора - Terfenol-D.

Разработан актюатор интеллектуальной дизельной форсунки на основе "Терфенолпласта" – компаун-

да, включающего Terfenol-D и матрицу эпоксидной смолы.

Проведенные по разработанной авторами методике измерения магнитострикции образцов "Терфенолпласта" показали, что в при напряженности магнитного поля 45 кА/м коэффициент магнитострикции составляет  $\lambda = 0,32 \times 10^{-3}$ .

Полученные результаты представляют большой интерес для разработки магнитострикционного привода дизельной форсунки.

### Список литературы:

1. Уорден К. Новые интеллектуальные материалы и конструкции. Свойства и применение. М.: Техносфера, 2006. – 224 с.
2. Белов К.П. Магнитострикционные явления. Материалы с гигантской магнитострикцией // Соросовский образовательный журнал. М. - 1998. № 3. - С. 112 – 117.
3. Metallurgical and mechanical compensation of the temperature response of terbium-based rare-earth magnetostrictive alloys. Патент WO 02/09205 А1 США, World International Property Organization, F02M 51/06. Siemens Automotive Corporation. Заявл. 21.07.2000, Оpubл. 31.01.2002.
4. P. Westwood, J.S. Abell, K. C. Pitman, Phase relationship in the Tb-Dy-Fe ternary system // J. Appl. Phys. (67), p. 4998-5000, 1990.
5. Magnetostrictive composites Пат. 5993565 США, МПК<sup>7</sup> H01F 1/03; F. Pinkerton et al.; General Motors Corporation; Заявл. 01.07.1996, Оpubл. 30.11.1999.
6. Composites with large magnetostriction Пат. 6849195 США, МПК<sup>7</sup> H01F 1/00; Rafil A. Basheer, Rochester Hills, Donald T. Morelli, White Lake; Delphi Technologies; Заявл. 03.04.2003, Оpubл. 01.02.2005.