

## ЛИТЕРАТУРА

1. Brode H. L. Phys. Fluids, 1959, 2, 2, 217.
2. Baker W. E. Explosions in Air.— Austin; London, 1973.
3. Бейкер У., Кокс П., Уэстейн П. и др. Взрывные явления. Оценка и последствия/ Под ред. Б. Е. Гельфанда и Я. Б. Зельдовича.— М.: Мир, 1986.
4. Адушкин В. В. ПМТФ, 1963, 5, 107.
5. Кореньков В. В., Охитин В. Н. ПМТФ, 1983, 3, 127.
6. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений.— М.: Наука, 1966.
7. Цикулин М. А., Попов Е. Г. Излучательные свойства ударных волн в газах.— М.: Наука, 1977.
8. Баум А. Ф., Орленко Л. П., Станюкович К. П. и др. Физика взрыва/Под ред. К. П. Станюковича.— М.: Наука, 1975.
9. Авилова И. В., Биберман Л. М., Воробьев В. С. и др. Оптические свойства горячего воздуха.— М.: Наука, 1970.
10. Анисимов С. И., Зельдович Я. Б. Письма в ЖТФ, 1977, 3, 20, 1081.
11. Киселев Ю. П., Крохин В. З. ПМТФ, 1976, 4, 151.
12. Христофоров Б. Д. ПМТФ, 1964, 6, 175.
13. Адушкин В. В., Немчинов И. В. ПМТФ, 1963, 4, 58.

Поступила в редакцию 4/III 1988

УДК 621.7.044.2

### УДАРНО-ВОЛНОВОЕ КОМПАКТИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИ АКТИВИРОВАННОГО ПОРОШКА СИСТЕМЫ Fe—Nd—В

*В. Ф. Нестеренко, Е. Г. Аввакумов, С. А. Першин,  
З. А. Кормилицына, А. Н. Лазариди, М. Ю. Язвицкий  
(Новосибирск)*

Прессование взрывом аморфных порошков металлических сплавов, полученных закалкой из расплава, использовалось в ряде работ, обзор которых приведен в [1]. Найдены критерии сохранения аморфной структуры, основанные на аналогии процессов охлаждения при получении исходного порошка и температурной релаксации в гетерогенно нагретом компакте [2].

В последнее время появились методы создания аморфных сплавов путем механического сплавления компонентов [3]. Этот класс материалов вследствие присущих ему специфических условий получения может существенно отличаться по физическим свойствам от быстрозакаленных сплавов. Так, их нельзя охарактеризовать таким параметром, как скорость закалки. Отметим, что быстрозакаленные аморфные сплавы испытывают значительные изменения своих свойств в результате размола [4], низкотемпературной обработки, пластической деформации [5] при сохранении параметров, выявляемых рентгеноструктурным анализом.

Большой интерес с точки зрения магнитных характеристик вызывают сплавы системы Fe—Nd—В, что связывается с появлением в процессе кристаллизации магнитно-твердой фазы  $Fe_{14}Nd_2B$  с тетрагональной структурой и постоянными решетки:  $a = 0,88$  нм,  $c = 1,22$  нм, обладающей высокой магнитной анизотропией [6]. Оптимальное состояние сплавов, из которых в дальнейшем может получаться магнитный материал, достигается быстрой закалкой расплавов [7] или механическим сплавлением компонентов [3].

В настоящей работе исследуется возможность получения взрывным компактированием объемных образцов из механического сплава системы Fe—Nd—В. Структура компактов изучалась калориметрическим, рентгеноструктурным и металлографическим методами с использованием по-

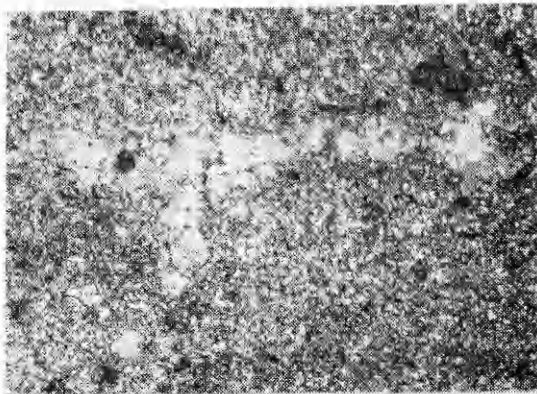
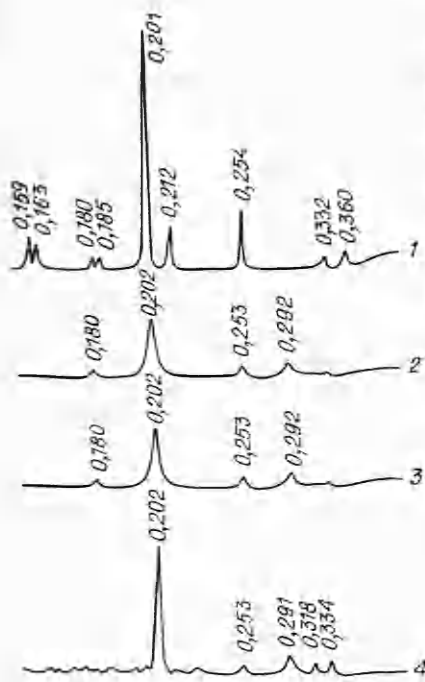


Рис. 2. Микроструктура компакта после взрывного прессования ( $\times 400$ ).

Рис. 1. Дифракционные кривые материала.

луколичественного химического микроанализа. Магнитные свойства исходных компактов и после термообработок измеряли на образцах, имеющих форму параллелепипеда.

Механической активации подвергли смесь из сплава  $\text{Fe}_2\text{V}$  и металлических неодима и железа в соотношении компонентов, соответствующей системе  $\text{Fe}_{14}\text{Nd}_2\text{B}$ . Активацию проводили на планетарной мельнице АГО-2 [8] в стальных барабанах со стальными шариками диаметром 5 мм в течение 30 мин. Дифрактограмма исходного сплава  $\text{Fe}_2\text{V}$  приведена на рис. 1, 1. В результате механической активации (рис. 1, 2) интенсивность основных рентгеновских отражений существенно снизилась, а некоторые (0,360; 0,212; 0,185; 0,163; 0,159) исчезли совсем.

В результате ударно-волнового компактирования получены пластины с размерами  $3 \times 25 \times 125$  мм. Образец представлял собой компактный материал из однородных по химическому составу частиц двух характерных размеров 1—3 и 10 мкм (рис. 2) без трещин, имеющий микротвердость  $300 \pm 20$  Нв и плотность  $7,46$  г/см<sup>3</sup>. Рентгеноструктурный анализ показал, что материал имеет кристаллическую структуру (см. рис. 1, 3). Сравнения спектров 3 и 2 (см. рис. 1) показывают, что компактирование не привело к заметным изменениям интенсивности рентгеновских отражений. Отжиг полученного компакта при температуре  $T = 1170$  К в течение 4 ч приводит к кристаллизации механоактивированного материала и появлению соответствующих рефлексов (см. рис. 1, 4).

На рис. 3 приведены данные калориметрии прессовки из механоактивированного сплава  $\text{Fe}_{14}\text{Nd}_2\text{B}$  (1) и быстрозакаленной аморфно-кристаллической ленты (2). На кривой 2 точка перегиба при  $T = 313$  °С соответствует релаксационным процессам в кристаллической фазе, а ярко выраженный пик — кристаллизации аморфной матрицы, начинающейся при  $T = 512$  °С. Легко видеть, что механоактивированный материал не имеет кристаллизационного пика. Релаксационные процессы начинаются при более низких температурах, чем в быстрозакаленном материале, и заканчиваются при  $T = 665$  °С.

Петля гистерезиса прессовки в исходном состоянии приведена на рис. 4. После низкотемпературных изохронных отжигов при  $T = 550, 600, 650$  °С ( $t = 60$  мин) незначительно возрастают коэрцитивная сила  $H_c$  (до 80 Э) и индукция насыщения, вид петли не меняется. После отжигов при  $T = 750, 800, 950$  °С ( $t = 60$  мин) наблюдается распад сплава

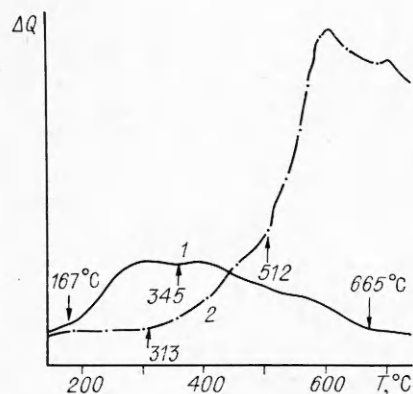


Рис. 3. Результаты калориметрических исследований.

на частицы, обедненные и обогащенные Nd. Их размер при этом не меняется. Химический распад сопровождается ростом остаточной индукции и индукции насыщения, достигающих  $B_r = 850$  Гс  $B_s = 10\,000$  Гс после часового отжига при  $950^\circ\text{C}$ , однако уровень коэрцитивной силы остается без изменений. Материал намагничивается до насыщения в низких полях  $\approx 3,5$  кЭ.

Таким образом, материал, полученный механической активацией с последующим взрывным компактированием, имеет кристаллическую структуру и более низкую структурную стабильность, чем быстрозакаленный продукт. Причиной низкой коэрцитивной силы в прессовках может являться окисление частиц в процессе размолла, а также то, что их размер больше размера однодомности для сплава  $\text{Fe}_{14}\text{Nd}_2\text{B}$ . Тем не менее принципиальный результат заключается в достижении химической однородности по составу, что важно для сплава системы Fe — Nd — B, которая сохраняется в компактах, полученных ударно-волновой обработкой.

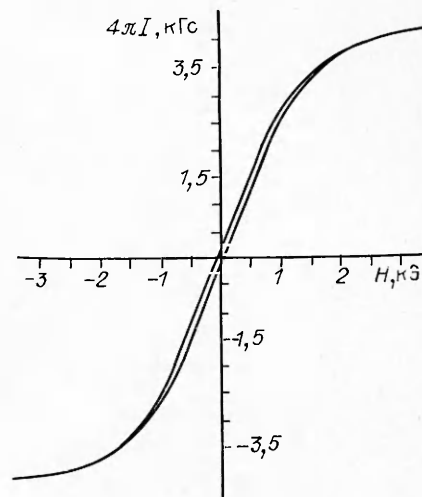


Рис. 4. Петля гистерезиса компакта после ударно-волновой обработки ( $H_c = 41,8$  Э,  $B_s = 4200$  Гс,  $B_r = 123$  Гс).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Нестеренко В. Ф. ФГВ, 1985, 21, 6, 85.
2. Нестеренко В. Ф., Музыкантов А. В. ФГВ, 1985, 21, 2, 120—126.
3. Аввакумов Е. Г. Механические методы активации химических процессов.— Новосибирск: Наука, 1987.
4. Исхаков Р. С., Кирко В. И., Кузовников А. А. и др. Исследование структуры массивного аморфного ферромагнитного сплава  $\text{Co}_{58}\text{Ni}_{10}\text{Fe}_5\text{B}_{16}\text{Si}_{11}$ , полученного методом взрывного прессования, по характеристикам локальной магнитной анизотропии.— Красноярск, 1984.— (Препр./СО АН СССР. Ин-т физики им. Л. В. Кпренского; № 265Ф).
5. Аморфные металлические сплавы/Под ред. Ф. Е. Люборского.— М.: Металлургия, 1987.
6. Hadjipanais G. S., Hazelton R. S., Lewies K. K. J. Appl. Phys., 1984, 55, 2073—2078.
7. Миляев И. М., Мехед Г. Н., Соколова Т. В. и др. // Физикохимия аморфных (стеклообразных) металлических материалов.— М.: Наука, 1987.
8. А. с. 975068 СССР, МКИ В 02 С 17/08. Планетарная мельница/Е. Г. Аввакумов, А. Р. Поткин, О. И. Самарин // Открытия. Изобрет.— 1982.— № 43.

Поступила в редакцию 27/V 1988,  
после доработки — 21/X 1988