

УДК 669.11:621.762.4.04

Динамическое компактирование порошков аморфных сплавов как перспективный способ получения изделий

В. А. Голубев, А. В. Стриканов,
В. Г. Бугров, Г. А. Потемкин,
В. Б. Куделькин, А. В. Голубев,
М. А. Мочалов

Приведены результаты разработки технологии динамического компактирования изделий из порошков аморфных сплавов. Представлено несколько вариантов взрывных устройств с использованием генератора плоской ударной волны для изготовления кольцевых магнитопроводов из порошков магнитомягких аморфных сплавов на основе железа с добавками кремния, бора и меди. Получены и сопоставлены механические, структурно-фазовые, электрические и магнитные характеристики исходных и компактированных аморфных сплавов. Показано, что динамическое компактирование приводит к увеличению магнитной проницаемости по сравнению с исходным порошком аморфного сплава в ~ 15 раз, удельные потери уменьшаются в ~ 4 раза.

Введение

У изготовителей электрооборудования всегда была актуальна проблема снижения энергетических потерь. Последние десятилетия эту проблему решают с помощью применения магнитомягких аморфных металлических сплавов для изготовления элементов электрооборудования. Аморфные магнитомягкие металлические сплавы обладают такими уникальными свойствами, как высокая магнитная проницаемость, низкая коэрцитивная сила и не зависящая от температуры электропроводность. Кроме того, у этих сплавов имеются дополнительные преимущества: высокая механическая вязкость, высокий предел текучести и необычайно высокое сопротивление коррозии [1].

Однако изготовление массивных деталей из аморфных сплавов – довольно непростая задача. Аморфные сплавы чаще всего получают в виде ленты толщиной порядка 25 мкм, в частности, методом закалки из расплава на быстровращающемся охлаждаемом барабане. Для получения аморфного состояния сплава требуется скорость охлаждения не ниже 10^6 градусов в секунду. Из полученной таким образом ленты формируют детали электрооборудования например кольцевые магнитопроводы, при этом формирование деталей сопровождается определенными трудностями, а получаемая пористость деталей довольно значительная.

В последние годы привлекают внимание изделия, изготовленные ударно-волновым компактированием из аморфных лент и порошков [2–8]. Как известно, во фронте ударной волны твердое вещество ведет себя подобно жидкости, поэтому с помощью метода динамического компактирования представляется возможным добиться существенно большей плотности упаковки частиц порошков аморфных сплавов. Большинство публикаций и патентов [2–8] были выполнены в 80–90-х годах прошлого века. С тех пор появились новые магнитомягкие аморфные

сплавы, и начаты подробные исследования с точки зрения наличия в их структуре нанокристаллических образований. Поэтому задача взрывного компактирования порошков аморфных магнитомягких сплавов остается актуальной.

Ниже приведены экспериментальные результаты исследований динамического компактирования порошков аморфных магнитомягких сплавов с помощью химического взрывчатого вещества (ВВ).

Исследуемые материалы

Для проведения исследований были выбраны порошки следующих сплавов: 5БДСР (состав: $\text{Fe}_{84,1}\text{Cu}_{1,3}\text{Nb}_{5,6}\text{Si}_{7,7}\text{B}_{1,3}$) и ГМ414 (состав: $\text{Fe}_{83,4}\text{Cu}_{1,3}\text{Nb}_{5,6}\text{Mo}_{2,8}\text{Si}_{7,7}\text{B}_2$) [9]. Это известные магнитомягкие сплавы, получаемые скоростной закалкой расплава на поверхности быстровращающегося охлаждающего барабана. Их достоинствами являются высокая индукция при низкой коэрцитивной силе, низкие потери на перемагничивание при высоких частотах, близкая к нулю магнитострикция, высокая магнитная проницаемость и высокое удельное электросопротивление. Порошки сплавов получали из ленты измельчением при низкой температуре. При этом частицы порошка имели вид вытянутых осколков пластинчатой чешуйчатой формы толщиной 20 и максимальной длиной 160 мкм. Порошок ГМ414 после размола был термообработан.

Прессуемость порошков

Проведено исследование прессуемости порошков сплавов 5БДСР и ГМ414. Испытания проводили на гидравлическом прессе. Для каждого испытуемого вещества снятие кривой прессуемости проводили двумя способами – со снятием и без снятия усилия прессования. Полученные результаты представлены на рис. 1 и 2.

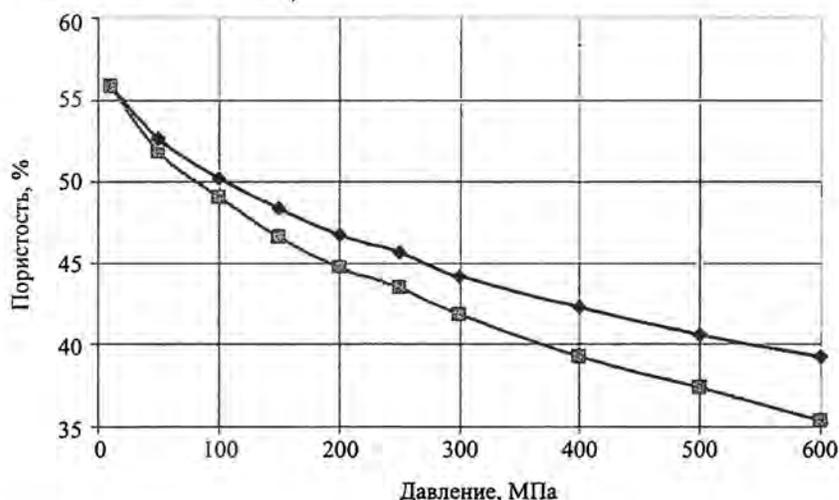


Рис. 1. Зависимость пористости порошка 5БДСР от давления прессования:
 —◆— без нагрузки; —□— под нагрузкой

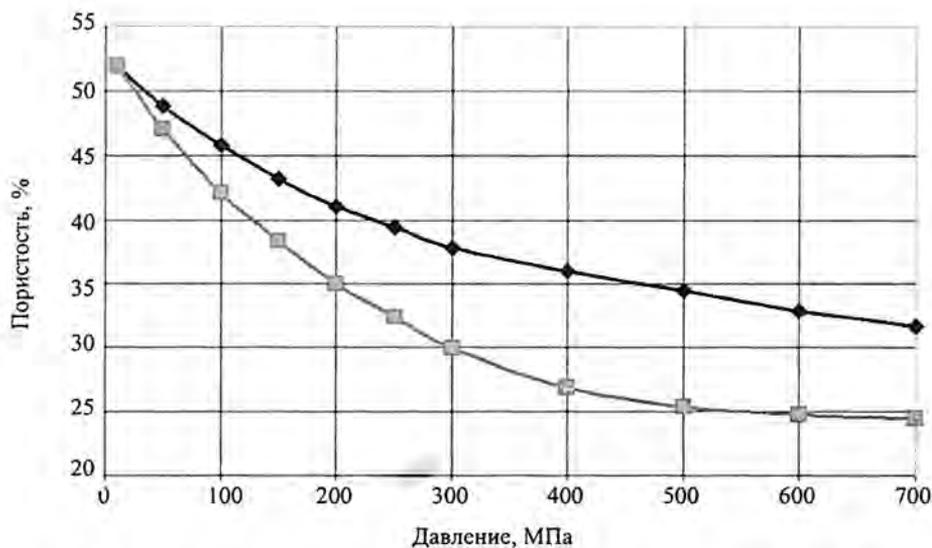


Рис. 2. Зависимость пористости порошка ГМ414 от давления прессования:
 —◆— без нагрузки; —□— под нагрузкой

Из рисунков видно, что при максимальном давлении прессования 700 МПа значение пористости для обоих порошков сплавов составило более 30 % после снятия нагрузки. Следует отметить, что после этой запрессовки порошок свободно высыпался из пресс-формы, т. е. не происходило деформации частиц, достаточной для их сцепления, что свидетельствует о невозможности получения образцов из этих порошков обычным прессованием. Разница в пористости около 5 % (при больших давлениях) между образцом, находящимся под нагрузкой, и образцом без нагрузки свидетельствует о наличии упругости и большого предела прочности частиц порошков, что характерно для аморфных сплавов.

Методика динамического компактирования

Для проведения динамического компактирования порошок аморфного сплава предварительно запрессовывали в ампулу сохранения, схема которой представлена на рис. 3. Ампула сохранения выполняет несколько функций: предохранение получаемого образца от разрушения, исключение загрязнения получаемого образца продуктами взрыва и придание скомпактированному порошку конечной формы.

Для решения задачи ударно-волнового компактирования магнитных материалов и получения компактных кольцевых магнитопроводов реализованы три варианта экспериментальных устройств, позволяющих варьировать в процессе динамического компактирования параметры ударных волн и размеры компактируемых образцов, их диаметры и толщины.

На рис. 4 представлено взрывное устройство с варьируемой плотностью ВВ. Заряд ВВ 5, инициируемый электродетонатором 8, размещается в толстостенном стальном корпусе 1 с навинчивающейся крышкой 7. На дне корпуса 1 под зарядом из ВВ 5 располагается ампула сохранения 2, 3 с компактируемым образцом 4. Заряд с варьируемой плотностью, прилегающий к ампуле сохранения, имел плотность от 0,5 до 1,7 г/см³. В этих условиях скорость детонации заряда составляла от 3,5 до 7,6 км/с. Варьируя плотностью заряда, получали различное давление во фронте ударной волны, входящей в ампулу сохранения. Давление в точке Жуге при этом варьировалось от 1,56 до 24,8 ГПа.



Рис. 3. Схема ампулы сохранения

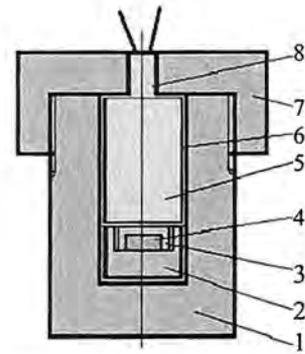


Рис. 4. Взрывное устройство с варьируемой плотностью взрывчатого вещества: 1 – корпус; 2 – корпус ампулы; 3 – колпачок ампулы; 4 – испытуемый материал; 5 – заряд ВВ; 6 – гильза; 7 – крышка корпуса; 8 – электродетонатор

На рис. 5 представлена фотография этой взрывной сборки в разобранном состоянии: корпус, крышка и ампула сохранения, а на рис. 6 – фотография взрывной сборки после испытаний. Можно заметить, что ампула сохранения сохранила свою целостность. На рис. 7 приведен второй вариант взрывного устройства с плоской детонационной волной, создающейся пенополистироловой линзой с большой рабочей зоной, позволяющей компактировать кольцевые магнитопроводы с внешним диаметром до 80 мм.

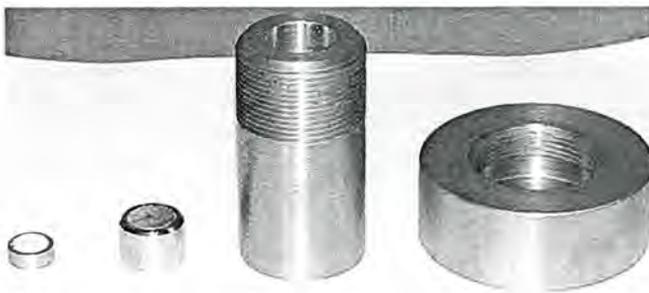


Рис. 5. Фотография взрывного устройства с варьируемой плотностью взрывчатого вещества в разобранном состоянии (до испытания)



Рис. 6. Фотография взрывного устройства с варьируемой плотностью взрывчатого вещества (после испытания)

На основание 7 устанавливается шашка из ВВ 5, к которой приклеивается линзовый заряд 1. Возбуждение детонации заряда 5 происходит от пенополистироловой линзы 2, которая, в свою очередь, задействуется от электродетонатора 3. Под действием взрыва заряда 5 взрывчатого вещества ГТК-70 и преодоления продуктами взрыва воздушного зазора в 7 мм в стальной преграде ампулы сохранения создается давление, значение которого зависит от толщины ВВ: при слое ВВ высотой 10 мм давление составляет примерно 10,5 ГПа, а при слое ВВ высотой 20 мм – 12,5 ГПа.

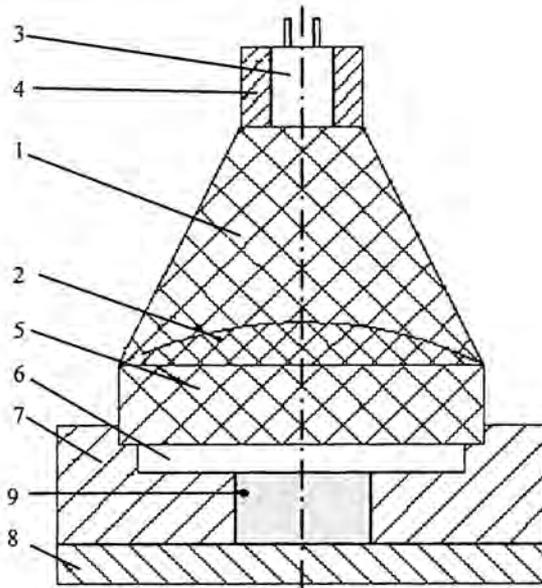


Рис. 7. Схема взрывного устройства с плоской детонационной волной, создающейся пенополистироловой линзой: 1 – заряд ВВ; 2 – линза; 3 – ЭД; 4 – розетка; 5 – шашка ВВ; 6 – воздушный зазор; 7, 8 – стальные пластины; 9 – ампула сохранения

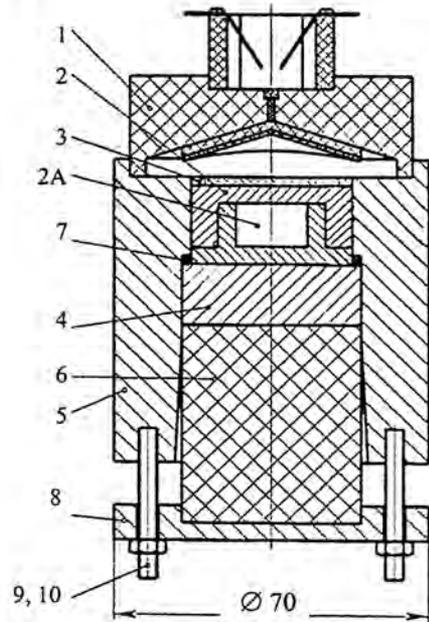


Рис. 8. Схема взрывного устройства: 1 – генератор плоской ударной волны; 2 – ампула сохранения; 2А – исследуемый образец; 3 – заряд ВВ; 4 – диск (стальной); 5 – корпус (стальной); 6 – демпфер (пенополиуретан); 7 – кольцо (сталь); 8 – поддон (сталь); 9, 10 – шпилька, гайка

Основную часть экспериментов по компактированию осуществляли в устройстве с фольговым линзовым зарядом, представленном на рис. 8 (аналогичное устройство приведено в [10]). Давление в ампуле сохранения 2, содержащей исследуемый образец 2А, создается зарядом ВВ толщиной 2–10 мм. В заряде ВВ 3 диаметром 38 мм и высотой 2–10 мм создается плоская детонационная волна с помощью генератора плоской ударной волны 1. Высота заряда 3 регулируется кольцом 7. Диск 4 из стали и демпфер 6 с поддоном 8 выбирались с таким расчетом, чтобы максимальные разрушающие напряжения концентрировались вне ампулы сохранения. Наружный корпус 5 сборки был изготовлен из стали Ст3. Между поддоном и диском расположен цилиндрический пенополиуретановый демпфер, который является хорошим амортизатором для камеры сохранения и способствует получению качественных образцов из магнитных материалов после ударно-волнового воздействия.

На рис. 9 представлена фотография ампулы сохранения до и после ударно-волнового нагружения. На фотографии видно, что ампула сохранения после ударно-волнового нагружения сохранила свою целостность.

Полученное изделие (в нашем случае кольцевой магнитопровод) извлекали из ампулы сохранения методом выгачивания на токарном станке. На рис. 10 показана фотография образца, извлеченного из ампулы сохранения. На фотографии заметно, что образец довольно хорошо сформирован.

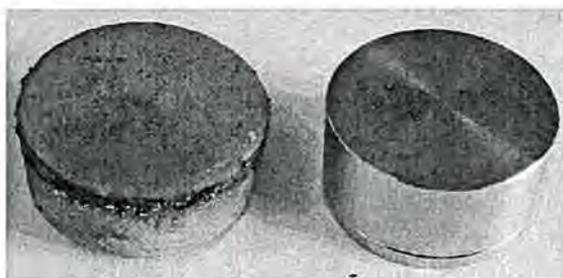
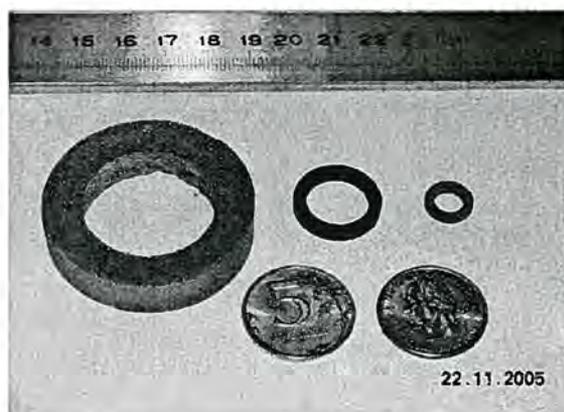


Рис. 9. Ампула сохранения до (справа) и после (слева) ударно-волнового нагружения



10. Образец, извлеченный из ампулы сохранения

Плотность частиц порошков сплавов

Проведено определение плотности частиц порошков сплавов и скомпактированных образцов методом гидростагического взвешивания. Методика определения плотности основана на определении величины выталкивающей силы порошкообразного вещества, помещенного в специальную кювету, при взвешивании образца в жидкости. Методика подробно описана в [11].

В результате измерения плотности частиц порошков сплавов получены следующие значения: для сплава 5БДСР – $7,13 \text{ г/см}^3$ (коэффициент вариации 0,42 %) и для сплава ГМ414 – $7,26 \text{ г/см}^3$ (коэффициент вариации 0,37 %).

Металлографические исследования

Металлографические исследования порошка и материала образца проводили на шлифах, изготовленных по общепринятой методике. Исследования и фотографирование микроструктуры порошка, а также материала образца проводили на металлографическом микроскопе НЕОРНОТ-32 и анализаторе изображений SIAMS-600.

Микроструктура исходного порошка представлена на рис. 11. На рисунке видно, что порошок в сечении имеет вид вытянутых осколков пластинчатой формы. При исследовании внешнего вида частиц порошка без приготовления шлифа выявлено, что они имеют вид плоских осколков.



Рис. 11. Исходный порошок ($\times 100$)

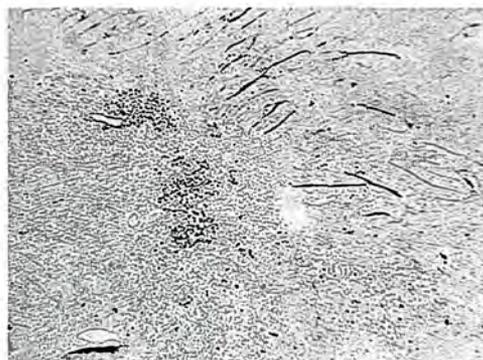


Рис. 12. Микроструктура материала образца после проведения компактирования ($\times 200$)

На рис. 12 представлена фотография структуры скомпактированного образца. Наблюдается достаточно плотная микроструктура с двумя характерными зонами: зона с зернисто-ячеистым строением и зона, в которой обнаружены скомпактированные частицы исходного порошка с нечеткими границами их раздела.

Определение магнитных характеристик образцов

Для измерения динамических характеристик магнитомягких материалов использовался один из вариантов электромагнитного метода. Суть метода заключается в том, что на исследуемый образец магнитного материала, выполненный в виде кольца, наматываются две обмотки: намагничивающая и измерительная. При пропускании по намагничивающей обмотке переменного тока в образце возникает переменное магнитное поле. Благодаря этому в измерительной обмотке появляется ЭДС, величина которой пропорциональна производной от магнитного потока, пронизывающего исследуемый образец.

В процессе работы для сравнения со скомпактированными образцами исследовались магнитные характеристики магнитопроводов, изготовленных засыпкой порошками из сплавов 5БДСР и ГМ414. Засыпку порошков и их подпрессовку производили в пустотелые тороиды, изготовленные из капролактана. Примеры результатов измерений представлены на рис. 13–16.

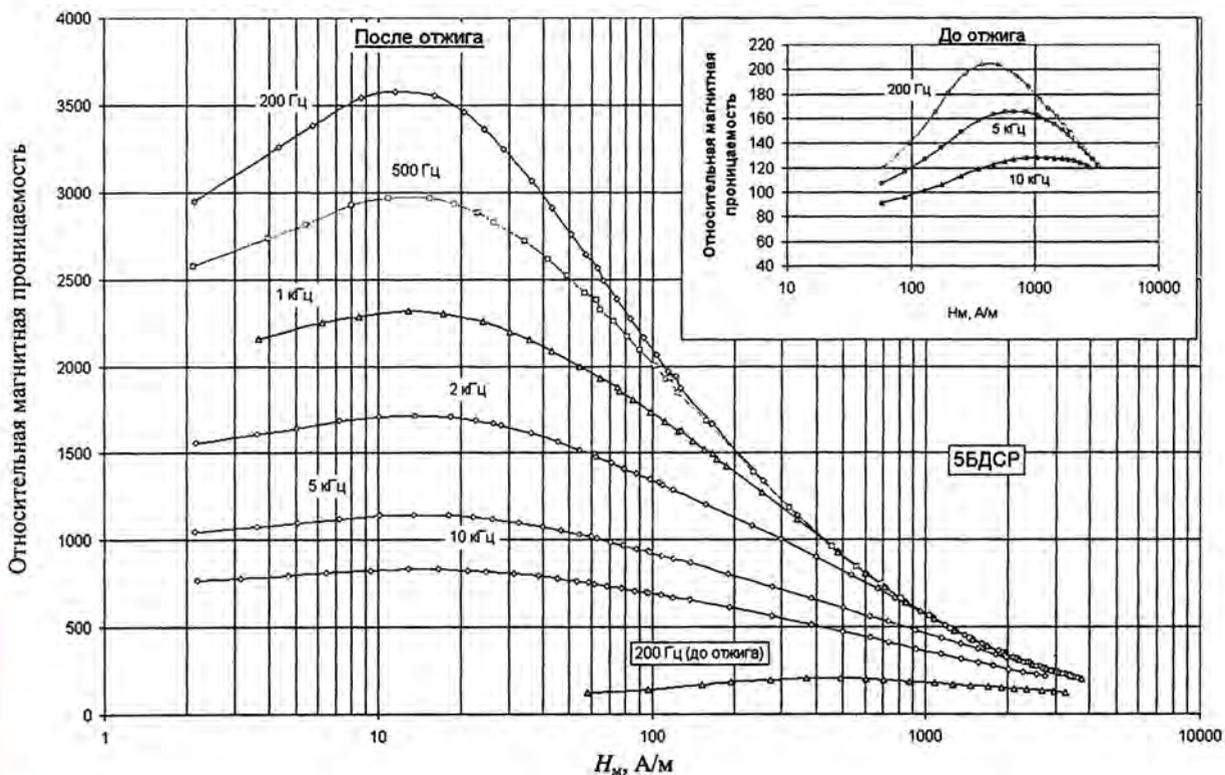


Рис. 13. Зависимость магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля магнитопровода, предварительно скомпактированного взрывным способом из аморфного сплава, термообработанного при температуре 530 °С в течение 0,5 ч при частотах 0,2–10 кГц

В целом компактирование аморфных магнитомягких порошков ГМ414, 5БДСР начинается при давлении за фронтом ударной волны ~ 3 ГПа, т. е. при толщине ВВ, равной ~ 2 мм, мы уже получаем магнитопроводы с удовлетворительным сцеплением частиц порошка. С увеличением толщины ВВ до 4–10 мм плотность компактов увеличивается, а магнитные свойства улучшаются только у сплава 5БДСР.

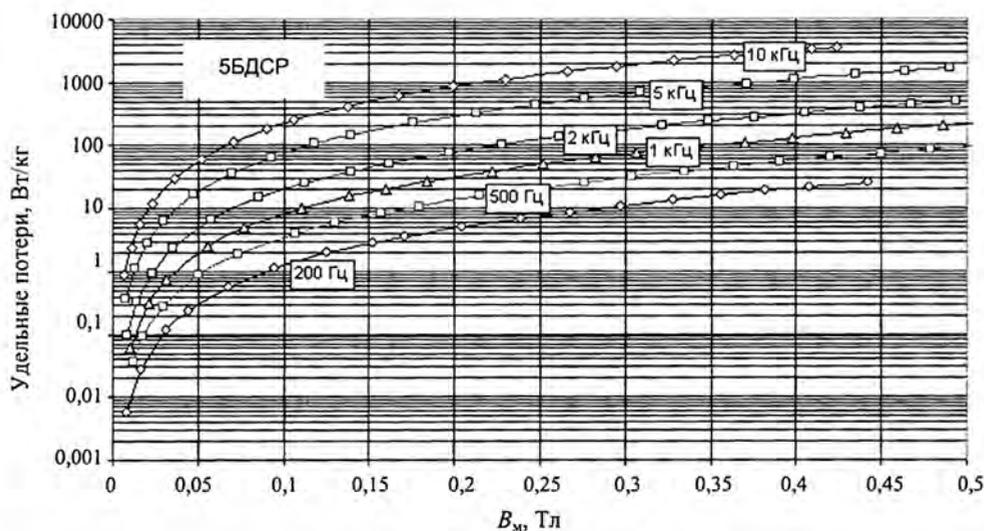


Рис. 14. Зависимость удельных потерь от магнитной индукции после ударно-волнового компактирования магнитопровода из сплава 5БДСР при частотах 0,2–10 кГц

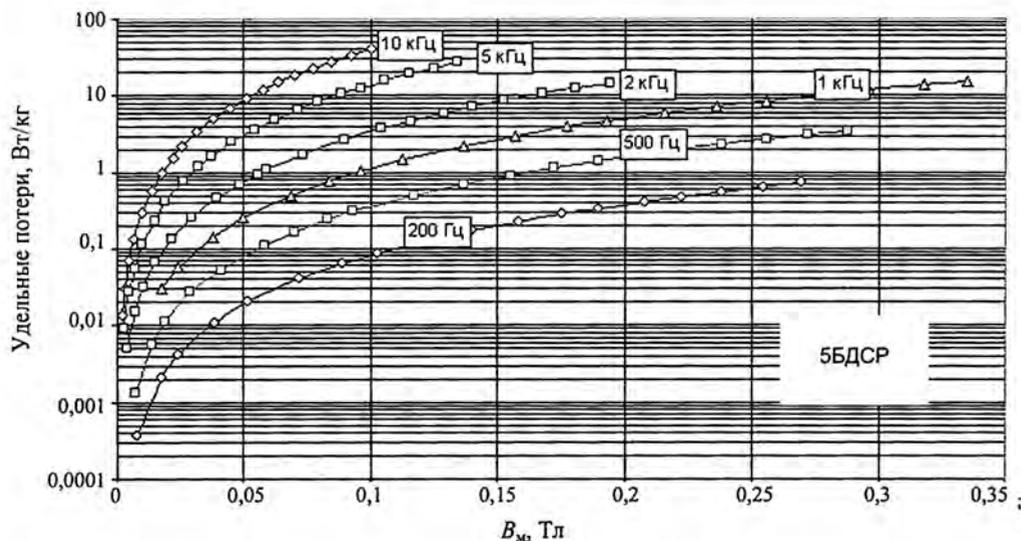


Рис. 15. Зависимость удельных потерь от магнитной индукции скомпактированного образца из сплава 5БДСР после термообработки при температуре 530 °С в течение 0,5 ч при частотах 0,2–10 кГц

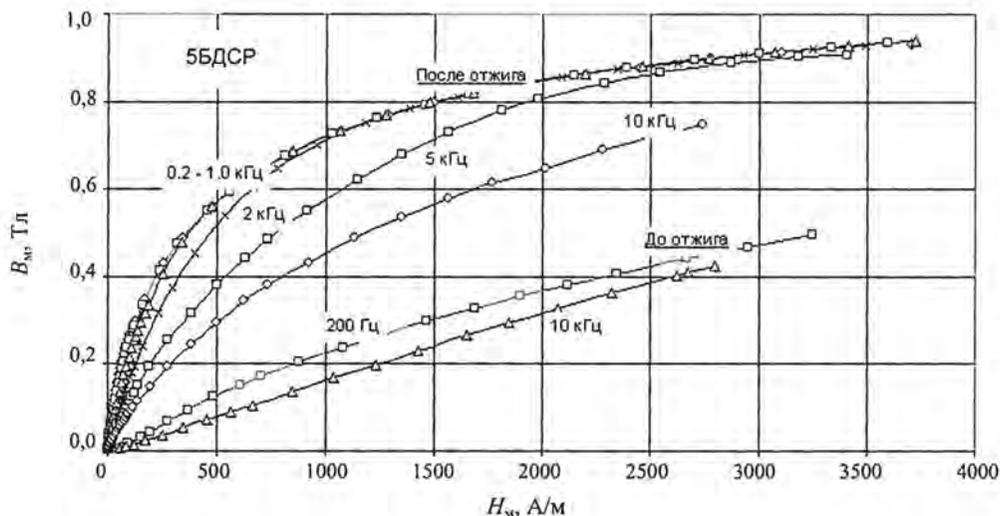


Рис. 16. Зависимость магнитной индукции от напряженности магнитного поля скомпактированного магнитопровода из сплава 5БДСР до и после термообработки при температуре 530 °С в течение 0,5 ч при частотах 0,2–10 кГц

Обсуждение результатов

Основные результаты по измерению магнитных характеристик скомпактированных ударно-волновым методом образцов аморфных сплавов 5БДСР и ГМ414 представлены ниже в таблице. Для сравнения в таблице приведены результаты измерения магнитных характеристик исходных и скомпактированных магнитопроводов после термической обработки (при температуре 530 °С в течение 0,5 ч) и термомагнитной обработки в магнитном поле $H = 2000$ А/м и при температуре 530 °С в течение 0,5 ч.

Таблица наглядно показывает, что ударно-волновое компактирование аморфных магнитомягких сплавов приводит к увеличению магнитной проницаемости магнитопроводов от 14 до 21 раза для 5БДСР во всех случаях компактирования (в том числе и с предварительным вакуумированием ампулы сохранения) и в 7,3–8,2 раза для ГМ414 (в том числе и для трехкратного ударно-волнового компактирования).

Термическая обработка заготовки существенно (в 10–18 раз) повышает магнитную проницаемость получаемых изделий, при этом в 5–12 раз уменьшаются удельные потери. Термическая обработка в магнитном поле повышает магнитную проницаемость получаемых изделий по сравнению с обычной термической обработкой на 3 %.

Таким образом, взрывное динамическое компактирование является эффективным способом изготовления кольцевых магнитопроводов из порошков магнитомягких сплавов. Скомпактированные и термообработанные кольца из сплава 5БДСР имеют примерно в 240 раз лучшую магнитную проницаемость по сравнению с исходным порошком.

Авторы благодарят В. К. Чернышева, В. Е. Коломийцева, С. А. Морозова за полезные обсуждения результатов исследований, А. И. Краева за ряд конструктивных решений, а также Н. С. Стриканову и Л. Б. Мокрушину за помощь в оформлении данной работы.

Работа выполнена по проекту МНТЦ № 1751.

Результаты измерения магнитных характеристик исходных и скомпактированных магнитопроводов

Материал	Состояние материала	Толщина ВВ, мм	Максимальная относительная магнитная проницаемость	Удельные потери, Вт/кг	
				$f = 0,2$ кГц $B = 0,5$ Тл	$f = 10$ кГц $B = 0,2$ Тл
Fe _{84,1} Cu _{1,3} Nb _{5,6} Si _{7,7} B _{1,3} (5БДСР)	Исходный порошок	–	14,9	1,6*	80*
	Заготовка после компактирования	4	205	35	860
		6	305	24	900
	Заготовка после компактирования с предварительным вакуумированием ампулы сохранения	6	250	15,8	670
	Изделие после термообработки заготовки при температуре 530 °С в течение 0,5 ч	4	3600	2,8	180
		6	3200	4,5	250
Изделие после термообработки заготовки при температуре 530 °С в магнитном поле напряженностью 2000 А/м в течение 0,5 ч	4	3700	2,9	190	
Fe _{83,4} Cu _{1,3} Mo _{2,8} Nb _{2,8} Si _{7,7} B ₂ (ГМ414)	Исходный порошок	–	18,8	–	–
	Заготовка после компактирования	2	160	80**	300
			155	60**	310
		4	140	65**	320
	Заготовка после трехкратного компактирования	4	137	70**	280
	Изделие после термообработки заготовки при температуре 530 °С в течение 0,5 ч в магнитном поле напряженностью 2000 А/м в течение 0,5 ч	2	343	–	224***
358			–	185***	

*Для $B = 0,06$ Тл; ** для $f = 0,5$ кГц; *** для $B = 0,1$ Тл.

Список литературы

1. Аморфные металлические сплавы / Под ред. Ф. Е. Люборского, перевод с англ. М.: Металлургия, 1987.
2. Нестеренко В. Ф. Возможности ударно-волновых методов получения и компактирования быстрозакаленных материалов // Физика горения и взрыва. 1985. Т. 22, № 6. С. 85.
3. Роман О. В., Богданов А. П., Волошин Ю. Н. и др. Структура и свойства аморфного порошкового материала после взрывного нагружения // Металловедение и термическая обработка металлов. 1983. № 10. С. 57.

4. Takagi M., Kawamura Y., Araki M et al. Preparation of bulk amorphous alloys by explosive consolidation and properties of the amorphous bulk // Mater. Sci. and Eng. 1988. 98. P. 457–460.
5. Волошин М. Н., Новакова А. А., Марков А. И. и др. Влияние динамического компактирования на микроструктуру аморфного сплава Fe-B-Si-C // Физика и химия обработки материалов. 1990. № 5. С. 118–124.
6. Jinyuan L., Baoron A., Tongxia L. and others. $M_{80}S_{20}$ metallic powders and its explosive consolidation // J. Mater. Sci. 1989. 24. N 5. P. 1753–1756.
7. Пат. 4490329 США, МКИ³ В 22F 1/00; В22F 1/02. Implosive consolidation of a particle mass including amorphous material / Alan W.Hare, Lawrence E. Murr, Paul F. Carlson // Dec. 25, 1984.
8. Пат. 4612161 США, МКИ³ В 22F 3/08. Fabrication of metallic glass structures / Carl F. Cline // Sep. 16, 1986.
9. Стародубцев Ю. Н., Безозеров В. Я. Магнитные свойства аморфных и нанокристаллических сплавов. Екатеринбург: Изд-во УрГУ, 2002.
10. Фундаментальные исследования РФЯЦ-ВНИИЭФ в области высоких плотностей энергии. Саров: ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ". 2003. С. 5.
11. Пат. 2038576 Россия, МКИ³ G 01N 9/10. Способ определения плотности твердых тел / В. Н. Лашков, В. С. Власова // БИ. 1995. № 18.

Dynamic Compacting of Powders of Some Amorphous Alloys

V. A. Golubev, A. V. Strikanov, V. G. Bugrov, G. A. Potemkin, V. B. Kudel'kin,
A. V. Golubev, M. A. Mochalov

Results of development of technology for dynamic compacting of products from amorphous alloys powders are demonstrated. The several versions of explosive devices using plane shock wave generator to produce circular magnetic conductors from powders of m-metal amorphous alloys on the basis of Fe with Cu, Si, B additives are shown.

The mechanical, structural-phase, electrical and magnetic properties of both initial and compacted amorphous alloys were obtained and compared as a result of the works performed. It was stated that dynamic compacting leads to ~ 15 times increase of magnetic conductivity with respect to initial amorphous alloys powder, besides the specific losses decrease by ~ 4 times.