

05,01

Магнитоэластический эффект в металлах в сильных импульсных магнитных полях

© А.К. Сойка¹, И.О. Сологуб², В.Г. Шепелевич³, П.А. Сивцова⁴

¹ Военная академия Республики Беларусь,
Минск, Белоруссия

² Частное унитарное предприятие „Allied Testing“,
Минск, Белоруссия

³ Белорусский государственный университет,
Минск, Белоруссия

⁴ Белорусский государственный институт метрологии,
Минск, Белоруссия

E-mail: soikaak@gmail.com

(Поступила в Редакцию 29 декабря 2014 г.)

Исследовано влияние сильных импульсных магнитных полей с амплитудой индукции от 5 до 40 Т на механические свойства фольг из Al, Zn, Sn и Al–Zn. Обнаружены новые особенности магнитоэластического эффекта, заключающиеся в значительном и, по-видимому, необратимом увеличении микротвердости фольг из Al и Al–Zn после однократного воздействия на них униполярного импульсного магнитного поля.

Обнаружение магнитоэластического эффекта (МЭЭ) в ионных кристаллах [1] и гипотеза о его электронной спин-зависимой природе [2,3], подтвержденная экспериментально [4–6], вызвали большой интерес к вопросу о влиянии магнитных полей на механические свойства магнитоупорядоченных твердых тел, обусловленный как научной значимостью этого нового явления, так и перспективами его практического использования. К настоящему времени обнаружен и исследован весьма обширный круг МЭЭ в различных диэлектрических, полупроводниковых, полимерных и металлических материалах при воздействии на них постоянных, переменных и импульсных магнитных полей в диапазоне индукций от долей тесла до 30 Т (см. обзоры [7–10]), а также при одновременном воздействии постоянного магнитного и микроволновых электромагнитных полей по методу электронного спинового резонанса [5,11].

Наибольший научный и практический интерес связан с МЭЭ, обладающими магнитным последствием (магнитной памятью), когда магнитоиндуцированные изменения свойств исследуемых материалов сохраняются достаточно долгое время после исчезновения воздействующих на них магнитных полей [12] или, что гораздо важнее, имеют необратимый характер [13]. Исследованиям и интерпретации (с точки зрения электронных спин-зависимых процессов в твердых телах [14]) различных МЭЭ в диэлектрических и полупроводниковых кристаллах посвящено огромное число работ (см. [7–14]). В то же время известно сравнительно немного работ, посвященных изучению при комнатных температурах МЭЭ в неферромагнитных металлах и сплавах, являющихся как наиболее трудными, так и наиболее важными для практики объектами подобных исследований [7,12,15].

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования влияния импульсного магнитного поля (ИМП) с амплитудой индукции до 40 Т на

микротвердость металлов при комнатной температуре. Использование именно ИМП связано с тем, что наше исследование изначально нацеливалось на обнаружение МЭЭ с долговременным магнитным последствием. Кроме того, индукция ИМП может намного превосходить достижимые значения индукции постоянных или переменных магнитных полей, что значительно повышает вероятность обнаружения новых результатов. В экспериментах использовался импульсный магнит [16], обеспечивающий многократное получение практически идентичных униполярных импульсов магнитного поля с амплитудой индукции до 40 Т [17].

Исследуемые образцы представляли собой прямоугольные полоски ($\sim 5 \times 15$ мм) фольг толщиной 0.2 мм из Al, Sn, Zn и Al–6 at.% Zn, полученных сверхбыстрой закалкой из расплава. Структура, физические свойства и методика изготовления этих фольг описаны в [18,19]. Полоски фольг закреплялись (спиртовым шеллачным лаком) на стеклянных пластинках и размещались в катушке импульсного магнита так, что силовые линии магнитного поля были параллельны их большей стороне. Тем самым минимизировались пондеромоторное и тепловое воздействия ИМП на фольги вследствие возникновения в них вихревых токов (скорости dB/dt изменения магнитного поля достигали величин $\sim 10^6$ Т/с).

Каждый из исследуемых образцов, вырезанных из одного куска соответствующей фольги, подвергался однократному воздействию ИМП, амплитуда индукции которого изменялась от 5 до 40 Т. Осциллограмма импульса магнитного поля приведена на рис. 1. Микротвердость фольг измерялась по Виккерсу на приборе ПМТ-3 с относительной погрешностью не более 5%. Нагрузка на индентор составляла 20 г, время действия нагрузки 30 с. Измерения микротвердости всех образцов проводились до и после наложения на них ИМП.

Результаты экспериментов для фольг из Al и Al–Zn приведены на рис. 2, *a* и *b*. Относительное изменение микротвердости ε образцов определялось по формуле

$$\varepsilon = (H - H_0)/H_0,$$

где H_0 и H — микротвердости образцов фольг до и после однократного воздействия на них ИМП. Значения H_0 составляли 200 и 565 МПа для фольг из Al и Al–Zn соответственно. Из рис. 2 видно, что в первом приближении микротвердость фольг линейно растет с ростом амплитуды индукции ИМП, т.е. имеет место отрицательный МПЭ, величина которого при амплитуде индукции ИМП 40 Т достигает 48 и 44% для Al и

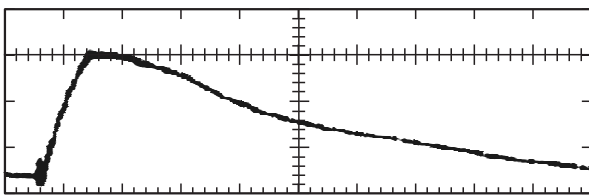


Рис. 1. Осциллограмма импульса магнитного поля. Развертка — 20 мкс/деление, по вертикали — 15 Т/деление.

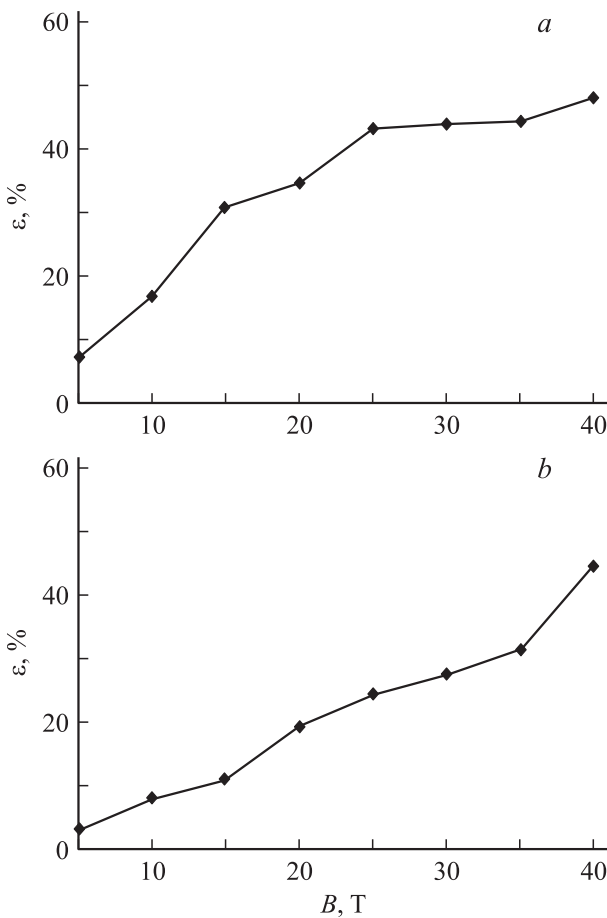


Рис. 2. Зависимости относительного изменения микротвердости ε от амплитуды индукции B импульсного магнитного поля для фольги из Al (*a*) и фольги из Al–Zn (*b*).

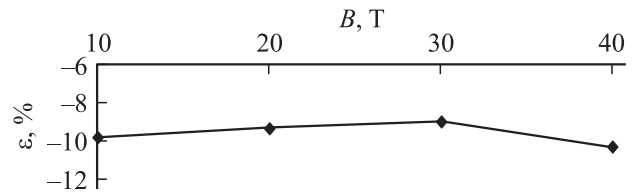


Рис. 3. Зависимость относительного изменения микротвердости ε от амплитуды индукции B импульсного магнитного поля для цинковой фольги.

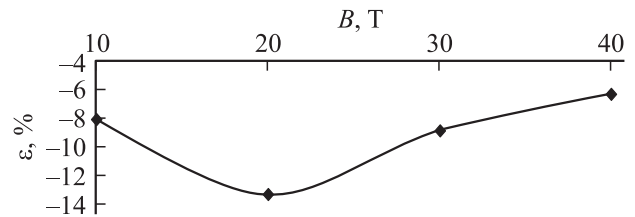


Рис. 4. Зависимость относительного изменения микротвердости ε от амплитуды индукции B импульсного магнитного поля для оловянной фольги.

Al–Zn соответственно. Следует заметить, что допирование фольги из Al атомами Zn (до 6 at.%) более чем в 2 раза повышает ее исходную микротвердость H_0 , однако магнитоиндуцированные изменения микротвердостей фольг из Al и Al–Zn практически одинаковы (для амплитуд индукции ИМП до 40 Т).

Результаты однократного воздействия ИМП с амплитудой индукции от 10 до 40 Т на фольгу из Zn ($H_0 = 326$ МПа) и на фольгу из Sn ($H_0 = 317$ МПа) представлены на рис. 3 и 4. Для каждой из этих фольг обнаруживается положительный МПЭ, т.е. имеет место разупрочнение фольги. Однократное наложение ИМП с амплитудой 10, 20, 30 и 40 Т на образцы цинковой фольги приводит практически к одинаковому результату — уменьшению их микротвердости на ~ 10% (рис. 3). Примерно такая же картина (в пределах ошибок измерений) наблюдается и в случае образцов оловянной фольги (рис. 4). Отличие состоит лишь в том, что при амплитуде индукции ИМП 20 Т проявляется максимум эффекта (уменьшение микротвердости оловянной фольги на ~ 13%).

Нужно подчеркнуть следующее обстоятельство. В наших экспериментах длительность промежутков времени между воздействием ИМП на все исследуемые образцы фольг и последующим измерением их микротвердости составляла не менее десяти суток. Результаты повторных измерений микротвердости исследованных образцов фольг из Al и Al–Zn, проведенные не менее чем через 11 месяцев после наложения на них ИМП, с точностью до $\pm 7\%$ подтвердили результаты первых измерений. Таким образом, обнаруженные изменения пластических свойств фольг из Al и Al–Zn, вызванные воздействием на них ИМП, являются, по-видимому, необратимыми.

Выяснение физической природы описанных выше МПЭ требует дальнейших исследований. По мнению авторов, теория электронных спин-зависимых процессов, объясняющая МПЭ в диамагнитных материалах [4–6,10–12,14], достаточно полно обоснована лишь для ионных кристаллов, которые не имеют электронов проводимости, вследствие чего представления этой теории не могут быть автоматически перенесены на металлы. Вклад электронов проводимости в силы сопротивления металла сжатию невелик (по сравнению с заполненными электронными оболочками атомов), но не учитывать его нельзя, как нельзя исключить и влияние магнитного поля на эти силы путем перераспределения электронной плотности между узлами кристаллической решетки. Точечные дефекты, роль которых в пластичности ионных кристаллов и в механизмах возникновения в них МПЭ велика, также значительно меньше сказываются на пластичности металлов. Таким образом, в данном случае необходимо не только более детальное изучение обнаруженных МПЭ, но и исследование, в том числе рентгенографическими и рентгеноспектральными методами, влияния ИМП на дефекты кристаллической и особенно электронной структуры металлических фольг.

Список литературы

- [1] В.И. Альшиц, Е.В. Даринская, Т.М. Перекалина, А.А. Урусовская. ФТТ **29**, 467 (1987).
- [2] В.И. Альшиц, Е.В. Даринская, Е.А. Петржик. ФТТ **33**, 3001 (1991)
- [3] М.И. Молоцкий. ФТТ **33**, 3112 (1991).
- [4] Ю.И. Головин, Р.Б. Моргунов, А.И. Тюрин, В.И. Иволгин. ДАН **361**, 352 (1998).
- [5] Ю.И. Головин, Р.Б. Моргунов, В.Е. Иванов, А.А. Дмитриевский. ЖЭТФ **117**, 1080 (2000).
- [6] В.И. Альшиц, Е.В. Даринская. Письма в ЖЭТФ **70**, 749 (1999).
- [7] Р.Б. Моргунов. Вестн. РФФИ **2**, 19 (2003).
- [8] В.И. Альшиц, Е.В. Даринская, М.В. Колдаева, Е.А. Петржик. Кристаллография **48**, 826 (2003).
- [9] А.А. Урусовская, В.И. Альшиц, А.Е. Смирнов, Н.Н. Беккауер. Кристаллография **48**, 855 (2003).
- [10] Ю.И. Головин. ФТТ **46**, 769 (2004).
- [11] В.И. Альшиц, Е.В. Даринская, М.В. Колдаева, Е.А. Петржик. ФТТ **54**, 305 (2012).
- [12] Р.Б. Моргунов, А.Л. Бучаченко. ЖЭТФ **136**, 505 (2009).
- [13] В.В. Постников, М.Н. Левин, Н.Н. Матвеев, Р.В. Скориданов, Н.С. Камалова, В.А. Шамаев. Письма в ЖТФ **31**, 9, 14 (2005).
- [14] Р.Б. Моргунов. УФН **174**, 131 (2004).
- [15] В.Ф. Мазанко, А.В. Покоев, В.М. Миронов. Диффузионные процессы в металлах под действием магнитных полей и импульсных деформаций. Машиностроение, М.; Самарский ун-т, Самара (2006). Т. 1, 2.
- [16] Б.Б. Бойко, А.К. Сойка, Л.П. Митьковская. ПТЭ **2**, 184 (1990).
- [17] А.К. Сойка. Письма в ЖТФ **14**, 3, 1238 (1988).
- [18] Е.С. Гутько, В.Г. Шепелевич. ФХОМ **4**, 81 (2005).
- [19] В.Г. Шепелевич, В.В. Лозенко. Вестник БГУ. Сер. 1. Физика, математика, информатика **1**, 20 (2009).