

УДК 535.374:537.6:621

А. К. Сойка, доктор физико-математических наук (БГТУ);

В. Г. Шепелевич, доктор физико-математических наук, профессор (БГУ)

ДОЛГОВРЕМЕННЫЙ ОТРИЦАТЕЛЬНЫЙ МАГНИТОПЛАСТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В МЕТАЛЛАХ, ВЫЗВАННЫЙ ВОЗДЕЙСТВИЕМ СИЛЬНОГО ИМПУЛЬСНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Экспериментально исследовано влияние сильных импульсных магнитных полей с индукцией 5–40 Тл на механические свойства фольг из Zn, Sn, Al, Al – Zn. В фольгах из Al и Al – Zn обнаружен отрицательный магнитопластический эффект с магнитной памятью, заключающийся в значительном и, по-видимому, необратимом увеличении микротвердости этих фольг после однократного воздействия на них униполярного импульсного магнитного поля.

The influence of strong pulsed magnetic fields with induction of 5–40 T on the mechanical properties of the foils Zn, Sn, Al, Al – Zn. In a foil of Al and Al – Zn magnetoplastic detected negative effect from the magnetic memory, comprising a wide and apparently irreversible increase the microhardness of the foils after a single exposure to a unipolar pulsed magnetic field.

Введение. Обнаружение магнитопластического эффекта (МПЭ) 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 свойства немагнитных твердых тел, обусловленный как научным интересом к МПЭ, так и перспективами его практического использования.

К настоящему времени известен весьма обширный круг различных МПЭ в диэлектрических, полупроводниковых, металлических и полимерных материалах в постоянных, переменных и импульсных магнитных полях от долей тесла до 30 Тл (см. обзоры [7–10]), а также при одновременном воздействии постоянных и микроволновых магнитных полей по методу электронного спинового резонанса [5, 11].

В большинстве МПЭ изменения пластичности твердых тел наблюдаются только в присутствии магнитного поля. Обнаружены также МПЭ с магнитной памятью, когда изменения механических свойств материалов сохраняются долгое время (часы, сутки и месяцы) после исчезновения магнитного поля или даже имеют необратимый характер [12]. Так, в [13] наблюдалось необратимое увеличение (до 50%) твердости модифицированной древесины после обработки ее серией импульсов магнитного поля с индукцией до 0,5 Тл.

Основная часть. В данной работе приведены результаты экспериментального исследования влияния импульсных магнитных полей (ИМП) с индукцией до 40 Тл на микротвердость металлов при комнатной температуре.

Исследуемые образцы представляли собой прямоугольные полоски ($5 \times 15 \text{ мм}^2$) фольг толщиной 0,2 мм из металлов Al, Sn, Zn и сплава Al – 6 ат. % Zn. Структура, физические свойства и методика изготовления этих фольг описаны в [14].

Полоски фольг приклеивались шеллачным лаком на стеклянные пластинки, которые размещались в катушке так, что линии магнитного поля были параллельны большей стороне полосок. Тем самым минимизировались пондеромоторное и тепловое воздействия ИМП на фольги вследствие наведения в них вихревых токов (скорости изменения магнитного поля $dB/dt \sim 10^6 \text{ Тл/с}$).

Каждый из исследуемых образцов подвергался однократному воздействию ИМП с амплитудой индукции от 5 до 40 Тл. Осциллограмма импульса магнитного поля приведена на рис. 1 [15].

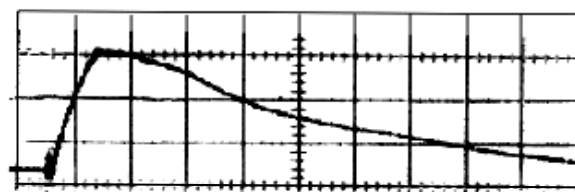


Рис. 1. Осциллограмма импульса магнитного поля. Развертка – 20 мкс/деление, по вертикали – 15 Тл/деление

Микротвердость фольги измерялась по Виккерсу на приборе ПМТ-3 с погрешностью не более 5%. Нагрузка на индентор составляла 20 г, время действия нагрузки – 30 с. Микротвердости образцов измерялись до и после наложения на них ИМП.

Результаты однократного воздействия ИМП с амплитудой индукции от 10 до 40 Тл на фольгу из Zn представлены на рис. 2, которые демонстрируют положительный МПЭ в этой фольге, т. е. имеет место разупрочнение фольги. Наложение ИМП с амплитудой 10, 20, 30 и 40 Тл на образцы цинковой фольги приводило практически к одинаковому результату – уменьшению их микротвердости примерно на 10%.

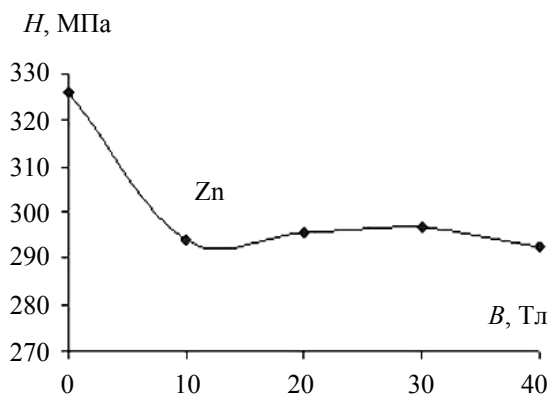


Рис. 2. Изменение микротвердости цинковой фольги в зависимости от индукции магнитного поля

Почти такая же картина (в пределах ошибок измерений) наблюдается и в случае образцов оловянной фольги (рис. 3). Различие состоит в том, что при индукции ИМП 20 Тл имеет место наибольшее ($\approx 13\%$) уменьшение микротвердости оловянной фольги, после чего она заметно увеличивается с ростом поля.

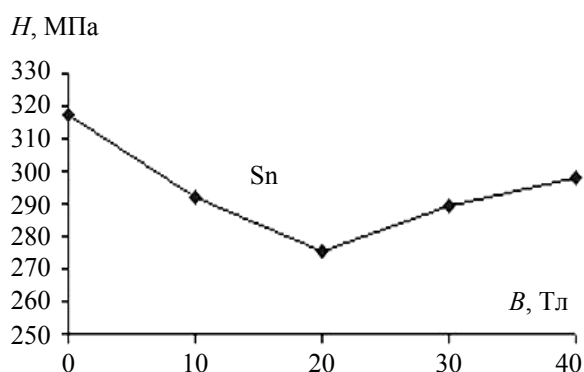


Рис. 3. Изменение микротвердости оловянной фольги в зависимости от индукции магнитного поля

Результаты экспериментов для фольг из Al и Al – Zn приведены на рис. 4. В первом приближении микротвердость фольг линейно растет с ростом индукции магнитного поля, т. е. в этих фольгах наблюдается отрицательный МПЭ, величина которого при амплитуде индукции ИМП 40 Тл достигает 48 и 44% для Al и Al – Zn соответственно.

Заметим, что допирование алюминиевой фольги атомами цинка (до 6 ат. %) более чем в два раза повышает ее исходную микротвердость (см. рис. 2), однако масштаб наблюдаемого в нашем случае МПЭ в фольге из Al и фольге из сплава Al – 6 ат. % Zn практически одинаков (при амплитудах индукции ИМП до 40 Тл).

Этот результат (без учета эффекта магнитной памяти) прямо противоположен данным

работы [8], согласно которым МПЭ в алюминии и цинке, наблюдаемый в присутствии внешнего постоянного магнитного поля с индукцией до 2 Тл, имеет положительный характер, т. е. пластичность этих металлов в магнитном поле увеличивается.

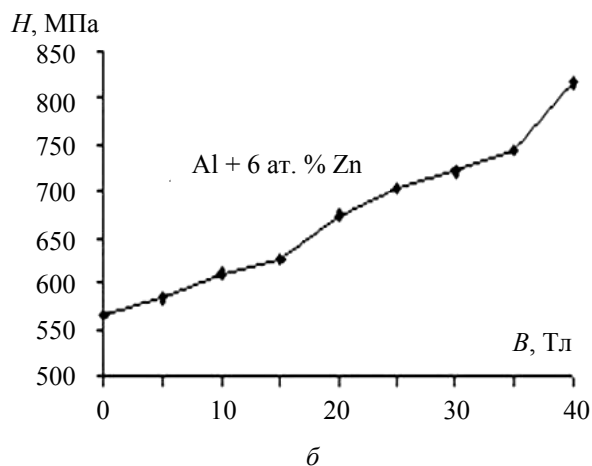
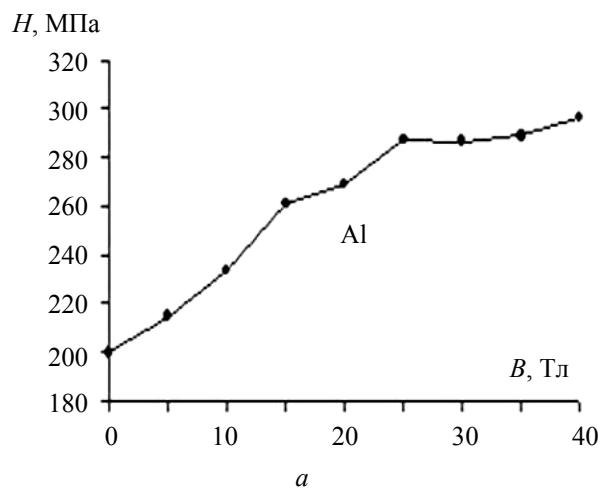


Рис. 4. Изменение микротвердости фольги в зависимости от амплитуды индукции магнитного поля: а – фольга из Al; б – фольга из Al – Zn

В наших экспериментах длительность промежутков времени между актом магнитной обработки образцов фольг, заключающейся в однократном наложении на них ИМП, и последующими измерениями их микротвердости составляла не менее 10-ти суток. Это означает, что обнаруженные в исследованных фольгах МПЭ носят, по меньшей мере, долговременный характер. Для образцов фольг из Al и Al – Zn спустя примерно не менее чем 11 месяцев после их магнитной обработки были проведены повторные измерения микротвердости, результаты которых с точностью до $\pm 7\%$ совпали с результатами первичных измерений, что позволяет считать, что в этих фольгах МПЭ является, по-видимому, необратимым.

Заключение. По мнению авторов, выяснение физической природы описанных выше МПЭ требует дальнейших исследований, поскольку известную теорию электронных спин-зависимых процессов в твердых телах, объясняющую МПЭ в диамагнитных материалах [7–12], можно считать достаточно обоснованной лишь для ионных кристаллов, у которых нет электронов проводимости, вследствие чего представления этой теории нельзя автоматически переносить на металлы.

Вклад электронов проводимости в силы сопротивления металла сжатию невелик (по сравнению с ролью заполненных электронных оболочек атомов), но не учитывать его нельзя, как нельзя исключить и влияние магнитного поля на эти силы путем перераспределения электронной плотности между узлами решетки. Точечные дефекты, роль которых в пластичности ионных кристаллов и механизмах возникновения в них МПЭ велика (согласно концепции электронных спин-зависимых процессов), также значительно меньше сказываются на пластичности металлов. Таким образом, 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 металлов.

Литература

1. О движении дислокаций в кристаллах NaCl под действием постоянного магнитного поля / В. И. Альшиц [и др.] // Физика твердого тела. 1987. Т. 29, вып. 2. С. 467–470.
2. «In situ» изучение магнитоэластического эффекта в кристаллах NaCl методом непрерывного травления / В. И. Альшиц [и др.] // Физика твердого тела. 1991. Т. 33, вып. 10. С. 3001–3010.
3. Молоцкий М. И. Возможный механизм магнитоэластического эффекта // Физика твердого тела. 1991. Т. 33, вып. 10. С. 3112–3114.
4. Магнитный резонанс в короткоживущих комплексах структурных дефектов в монокристаллах NaCl / Головин Ю. И. [и др.] // Доклады Академии наук. 1998. Т. 361, № 3. С. 352–354.

5. Эффекты разупрочнения ионных кристаллов, вызванные изменением спиновых состояний в условиях парамагнитного резонанса / Ю. И. Головин [и др.] // ЖЭТФ. 2000. Т. 116, вып. 6. С. 1080–1093.

6. Альшиц В. И., Даринская Е. В. Магнитоэластический эффект в кристаллах LiF и продольная релаксация спинов // Письма в ЖЭТФ. 1999. Т. 70, вып. 11. С. 749–753.

7. Моргунов Р. Б. Спин-зависимые реакции между дефектами структуры и их влияние на пластичность кристаллов в магнитном поле // Вестник РФФИ. 2003. № 2. С. 19–46.

8. Магнитоэластический эффект: основные свойства и физические механизмы / В. И. Альшиц [и др.] // Кристаллография. 2003. Т. 48, № 5. С. 826–854.

9. Эффекты магнитного воздействия на механические свойства и реальную структуру немагнитных кристаллов / А. А. Урусовская [и др.] // Кристаллография. 2003. Т. 48, № 5. С. 855–872.

10. Головин Ю. И. Магнитоэластичность твердых тел (Обзор) // Физика твердого тела. 2004. Т. 46, вып. 5. С. 769–803.

11. Изменение микротвердости немагнитных кристаллов после их экспозиции в магнитном поле Земли и в переменном поле накачки в схеме ЭПР / В. И. Альшиц [и др.] // Физика твердого тела. 2012. Т. 54, вып. 2. С. 305–312.

12. Моргунов Р. Б., Бучаченко А. Л. Магнитоэластичность и магнитная память в диамагнитных твердых телах // ЖЭТФ. 2009. Т. 136, вып. 3 (9). С. 505–515.

13. Воздействие слабых импульсных магнитных полей на модифицированную древесину / В. В. Постников [и др.] // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31, вып. 9. С. 14–19.

14. Шепелевич В. Г., Лозенко В. В. Структура и физические свойства фольги и сплавов на основе цинка и кадмия, полученных сверхбыстрой закалкой из расплава // Вестник БГУ. Сер. 1. 2009. № 1. С. 20–26.

15. Сойка А. К. Автоматический плазменный кроубар // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14, вып. 3. С. 1238–1241.

Поступила 27.02.2014