

УДК: 537.638

## **ОЦЕНКА ЛОКАЛЬНОГО МОДУЛЯ ЮНГА НА ПОВЕРХНОСТИ МОНОКРИСТАЛЛА $Du_2Fe_{17}$**

**Ю. В. Кузнецова, С. А. Карпушкин, Ю. С. Кошкидько**

Тверской государственной университет  
*кафедра магнетизма*

Продемонстрирован метод оценки упругих свойств с помощью сканирующего зондового микроскопа Solver P47. Получено значение модуля Юнга на поверхности монокристаллического образца  $Du_2Fe_{17}$  методом контактной силовой спектроскопии.

**Ключевые слова:** *модуль Юнга, упругие свойства, контактная силовая микроскопия, методы атомно-силовой микроскопии*

Методы атомно-силовой микроскопии (АСМ) являются эффективным средством визуализации микро- и наноструктур. Эти методы обладают рядом важных особенностей, поскольку допускают проводить измерения в широком диапазоне внешних условий. Однако, кроме простой (качественной) визуализации рельефа поверхности, АСМ обладает значительным потенциалом, позволяющим получать количественные оценки различных физических и химических свойств поверхностей.

Одним из эффективных методов АСМ при исследовании упругих свойств поверхности является атомно-силовая спектроскопия (АСС). В ее основе лежит регистрация силовых кривых, которые отражают отклонение кантилевера при взаимодействии вершины зонда с поверхностью. Анализ таких кривых позволяет получать данные об адгезионных и упругих свойствах поверхности.

В качестве объектов исследования в данной работе были выбраны монокристаллы  $Du_2Fe_{17}$ , имеющие гексагональную кристаллическую решетку типа  $Th_2Ni_{17}$ [3]. Исходный сплав был получен методом индукционной плавки в атмосфере аргона. Оценка модуля Юнга проводилась на поверхности плоскопараллельного шлифа монокристалла в различных точках поверхности.

Силовые кривые, снимаемые с помощью АСС, представляют собой зависимость электрического напряжения на фотодетекторе от вертикального положения пьезосканера, т.е.  $DFL(z)$ . Программное обеспечение сканирующего зондового микроскопа содержит готовые скрипты. Скрипт `DFL_to_Force` производит конвертацию единиц измерения сигнала  $DFL$  из относительных единиц (нА) в единицы силы (нН). Применение данного скрипта позволило получить на установке сканирующего зондового микроскопа Solver P47 силовые кривые  $F(z)$  на поверхности монокристаллического образца  $Du_2Fe_{17}$ , одна из

которых представлена на рис. 1. Силовые кривые, измеренные в различных точках плоскости шлифа, имеют идентичный вид, поскольку упругие свойства определялись в одном кристаллографическом направлении.

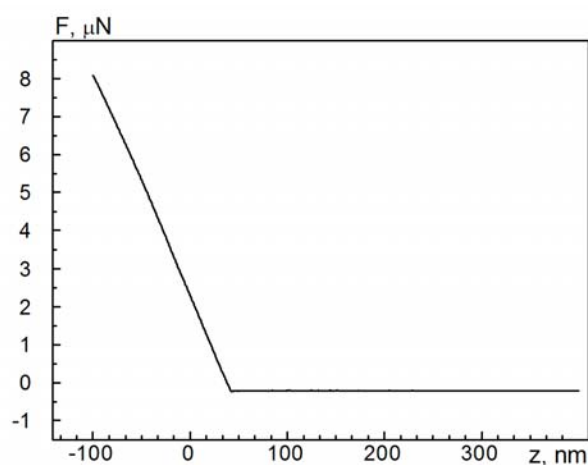


Рис. 1. Силовая кривая, полученная на поверхности монокристалла  $Du_2Fe_{17}$

Для получения кривой, действительно несущей информацию о силе, требуется провести замену переменных. Это связано с тем, что перемещение по вертикали пьезосканера  $z$  фактически является расстоянием между уровнем поверхности и уровнем, на котором находилась бы игла недеформированного кантилевера. Реальное расстояние между иглой и образцом  $\delta$  складывается из смещения пьезосканера  $z$  и отклонения кантилевера  $d$ . После замены переменных  $z \rightarrow \delta + d$  силовая кривая в тех же координатах выглядит более полого. Силу взаимодействия можно найти по закону Гука:

$$F = kd = k(z - \delta) \quad (1)$$

где  $k$  – нормальная составляющая жесткости кантилевера.

Согласно известной модели Герца [1], в которой рассматривается взаимодействие соприкасающихся поверхностей сферы и плоскости, сила равна:

$$F = \frac{4}{3} \frac{E}{(1-\nu^2)} \delta^{1.5} \sqrt{R} \quad (2)$$

где  $E$  – модуль Юнга,  $\nu$  – коэффициент Пуассона,  $R$  – радиус иглы. Таким образом,  $F = A\delta^{1.5}$ , где  $A$  – коэффициент пропорциональности,  $\delta$  – деформация образца в приближении недеформированного зонда.

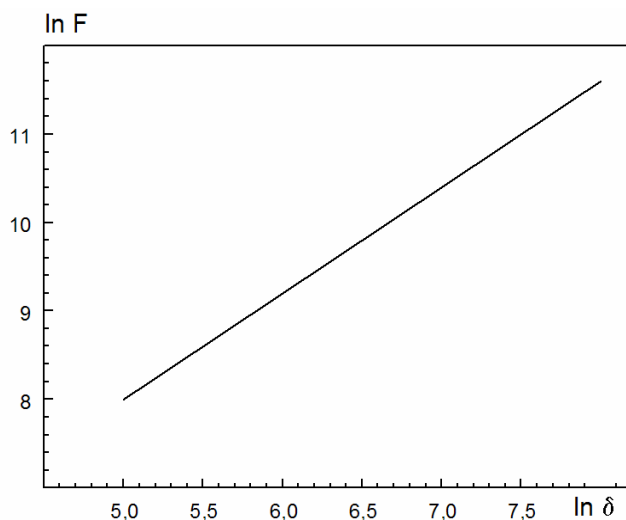


Рис. 2. Зависимость силы взаимодействия от отклонения в логарифмических единицах

Построив график зависимости логарифма силы от логарифма отклонения, получаем прямую вида  $Y = kX + B$ , где  $k \approx 1,5$ ,  $B = \ln A$ , представленную на рис. 2. По формуле (2) находим значения локального модуля упругости. Таким образом, мы получили, что локальный модуль Юнга на поверхности  $Dy_2Fe_{17}$  равен 206,684 ГПа.

Найденное значение модуля Юнга позволит оценить значения магнитоупругой энергии, а также магнитотепловых свойств магнетика, связанных с деформацией, вызванной магнитострикцией и тепловым расширением [2].

Работа выполнена при поддержке программы Министерства образования и науки РФ «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы.

#### Список литературы

1. Bukharaev A.A., Mozhanova A.A., Nurgazizov N.I., Ovchinnikov D.V. Measuring local elastic properties of cell surfaces and soft materials in liquid by atomic force microscopy // Phys. Low-Dimensional Structures. 2003. V. 3-4. P. 31-37.
2. Tishin A.M. and Spichkin Y.I. The Magnetocaloric Effect and Its Applications, 1st ed. (Institute of Physics), Bristol, 2003.
3. Buschow K.H.J. The crystal structures of the rare-earth compounds of the form  $R_2Ni_{17}$ ,  $R_2Co_{17}$  and  $R_2Fe_{17}$  // J. Less-Common Met. 1966. V. 11 (3). P. 204-208.

**EVALUATION OF LOCAL YOUNG MODULUS AT THE SURFACE OF Dy<sub>2</sub>Fe<sub>17</sub> SINGLE CRYSTAL**

**Yu. V. Kuznetsova, S. A. Karpushkin, Yu. S. Koshkidko**

Tver State University  
*Chair of magnetism*

A method is demonstrated of the evaluation of elastic properties with the aid of scanning probe microscope Solver P47. The value of the Young modulus at the surface of Dy<sub>2</sub>Fe<sub>17</sub> single crystal was obtained by the method of contact force microscopy.

**Keywords:** *Young modulus, elastic properties, contact force microscopy, atomic force microscopy methods*

*Об авторах:*

КУЗНЕЦОВА Юлия Васильевна – ведущий инженер кафедры магнетизма ТвГУ;

КАРПУШКИН Сергей Александрович – студент кафедры магнетизма ТвГУ;

КОШКИДЬКО Юрий Сергеевич – аспирант кафедры магнетизма ТвГУ.