## Зависимость поля и его градиентов двухкольцевой блочной магнитной системы от направления намагниченности в блоках

В настоящее время магнитные поля широко применяются при выполнении научно-исследовательских работ, а также в разных отраслях промышленности, при проведении магнитного неразрушающего контроля и диагностики. При этом для решения разных по характеру задач требуется создание магнитных полей, различающихся в широком диапазоне, как по величине, так и по характеру распределения. В нефтегазовой отрасли первостепенное значение придается диагностике состояния газо- и нефтепроводов, при этом необходимо обеспечить две технологические операции с использованием магнитных систем: очистка трубопроводов от ферромагнитных предметов, а также их продольное и поперечное намагничивание для индикации дефектов различной ориентации. Для приборов, установок и оборудования, действие которых основано на пондеромоторном действии магнитного поля основным параметром является произведение модуля напряженности магнитного поля на его градиент. К числу такого оборудования относятся диагностические и очистные поршни газо- и нефтепроводов. Ранее нами была предложена двухкольцевая магнитная система очистки трубопроводов более эффективная по сравнению с существующими. В данном сообщении приведены результаты расчетов по влиянию направления намагниченности источников поля в кольцах и расстояния между кольцами на силовые характеристики такой системы.



Рассмотрена двухкольцевая магнитная система, состоящая из двух одинаковых кольцевых поясов, каждый из которых содержит шесть идентичных по геометрии постоянных магнитов, расположенных на одинаковых расстояниях от оси симметрии системы (оси z). Магниты имеют форму параллелепипеда со сторонами а, с и l, где l - ребро, параллельное оси системы. Сечение кольцевого пояса плоскостью перпендикулярной оси представляет собой шесть прямоугольников со сторонами c и а, вписанных в окружность радиуса RK таким образом, что они касаются её двумя крайними точками сторон, имеющих длину а, а сторона c параллельна вектору намагниченности постоянного магнита. Рассмотрено два случая намагниченности магнитов в кольцевых поясах: знаки постоянных магнитов в кольце чередуются (NS) и без чередования знаков (NN).



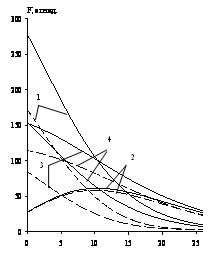
Расчёт магнитного поля такой системы представляет собой 3-мерную задачу магнитостатики. Будем считать материал магнитов абсолютно жестким магнетиком. В этом приближении, для случая отсутствия мягких магнетиков, хорошо работает метод граничных интегральных уравнений . При расчёте поля по этому методу необходимо проинтегрировать магнитные заряды, распределенные с постоянной плотностью по поверхности всех магнитов, входящих в каждый из двух кольцевых поясов. Магниты, входящие как в один, так и во второй кольцевой пояс, идентичны по геометрии, но при этом занимают разное положение в пространстве. С учетом указанных особенностей конструкции рассматриваемой нами магнитной системы, было получено общее выражение для численного расчёта поля от любого магнита и от всей системы в целом, разработан алгоритм и написана программа на алгоритмическом языке FORTRAN для реализации этого алгоритма.



Расчеты проводились для магнитной системы, имеющей размеры RK = 44,5 см, c = 12 см, а=20 см, l=8 см. Силовое действие магнитной системы оценивалось по величине равной произведению модуля поля Н на его градиент. Было получено, что распределение модуля поля Н рассматриваемой нами магнитной системы характеризуется ярко выраженной угловой зависимостью. Поэтому расчет модуля поля Н проводился с шагом в 1° для точек, расположенных на двух разных дугах для всего периода повторяемости, который для нашей магнитной системы равен 30°. Первая дуга удалена от оси системы на расстояние r1=58 см, а вторая - на расстояние r2=59 см, при этом величина силы приписывалась среднему значению радиуса r=58,5 см. Все рассчитанные значения силы суммировались, полученная сумма делилась на количество точек счёта. Тем самым определялось значение средней по углу силы.

Для вышеописанной магнитной системы на рисунке 1 представлены результаты расчётов зависимости среднего по углу силового действия двухкольцевой магнитной системы на расстоянии r=58,5 см от ее оси от величины зазора d между ближайшими торцами магнитных колец: а) - в центральной плоскости симметрии системы (центр рабочей зоны); б) - на внутреннем краю кольцевого магнитного пояса (край рабочей зоны). Учитывая симметрию системы, можно утверждать, что во всей остальной рабочей зоне, находящейся между центром зазора и внутренним краем любого из двух магнитных колец, зависимости силового действия двухкольцевой магнитной системы от зазора между магнитными поясами будут плавно изменяться от зависимостей, представленных на рисунке 1а), до зависимостей, представленных на рисунке 1б) (при движении от центра зазора к магнитному кольцу).

а



б

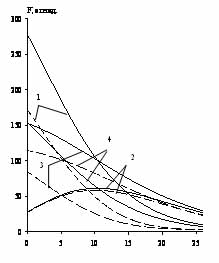


Рис.1 - Зависимость силового действия двухкольцевой магнитной системы от зазора между магнитными поясами: а) - центральная плоскость симметрии системы; б) - внутренний край кольцевого пояса.

Непрерывные кривые на рисунке представляют зависимости для систем с чередующимся направлением намагниченности магнитов в кольцевых поясах (NS), а штриховые - с одинаковым (NN). При этом зависимости 1 получены для систем, имеющих одинаковое направление намагниченности магнитов в кольцевых поясах; зависимости 2 относятся к системам с противоположным направлением намагниченности магнитов в кольцевых поясах; зависимости 3 получены для систем с одинаковым направлением намагниченности магнитов в первом и втором кольцевом поясе, но сами пояса развернуты друг относительно друга на угол =30°; зависимости 4 - направление намагниченности магнитов в первом кольцевом поясе противоположно направлению намагниченности магнитов во втором кольцевом поясе и пояса развернуты друг относительно друга на угол=30°.



Из анализа результатов расчетов, представленных на рисунке, следует, что во всех рассмотренных случаях очевидно преимущество магнитных систем с чередующейся ориентацией намагниченности магнитов в кольцевых поясах (NS), так как такие системы производят большее силовое действие. Получено, что для рассмотренных конструкций магнитных систем минимум модуля поля всегда наблюдается в серединах промежутков между соседними магнитами (=30°). Поэтому просчитан вариант, когда магнитные пояса развернуты друг относительно друга на угол =30°, чтобы максимум поля одного пояса и минимум поля другого совпадали. Этому варианту конструкций магнитных систем соответствуют результаты расчетов, представленные на рисунке зависимостями 3 и 4. Видно, что для малых зазоров (до 13 см) надо отдать преимущество системам с одинаковым направлением намагниченности магнитов в кольцевых поясах, которые не развернуты относительно друг друга и с чередующейся ориентацией намагниченности магнитов в кольцах (NS). Для величины зазора между кольцевыми поясами превышающей 13 см, в очистных поршнях целесообразно устанавливать системы, состоящие из двух идентичных магнитных кольцевых поясов, развернутых друг относительно друга на угол =30°, чтобы максимум поля одного кольцевого пояса и минимум поля другого кольцевого пояса совпадали.



Таким образом, исходя из проведенных исследований, можно сделать следующие рекомендации по оптимизации конструкции магнитных систем диагностических и очистных поршней газо - и нефтепроводов:

1. Большее силовое действие производят магнитные системы, состоящие из кольцевых поясов, в которых установлены магниты с чередующейся (по отношению к оси системы) ориентацией намагниченности (NS).

2. Поскольку поле магнитной системы имеет минимумы в серединах промежутков между соседними магнитами, то для величины зазора между кольцевыми поясами превышающей 13 см имеет смысл оснащать очистной поршень двумя магнитными кольцами, развернутыми друг относительно друга на угол =30°.



На основе нейтронных исследований рассмотрены фазовые превращения в аморфных и нанокристаллических системах различного типа (углеродных, металл-водородных и углеводородных), обусловленных влиянием поверхности, лапласова давления и примесей. Установлено наличие полиаморфных переходов, связанных с существованием реальных или виртуальных кристаллических аналогов, а также возникновением метастабильных фаз и рассмотрены возможные приложения полученных результатов.

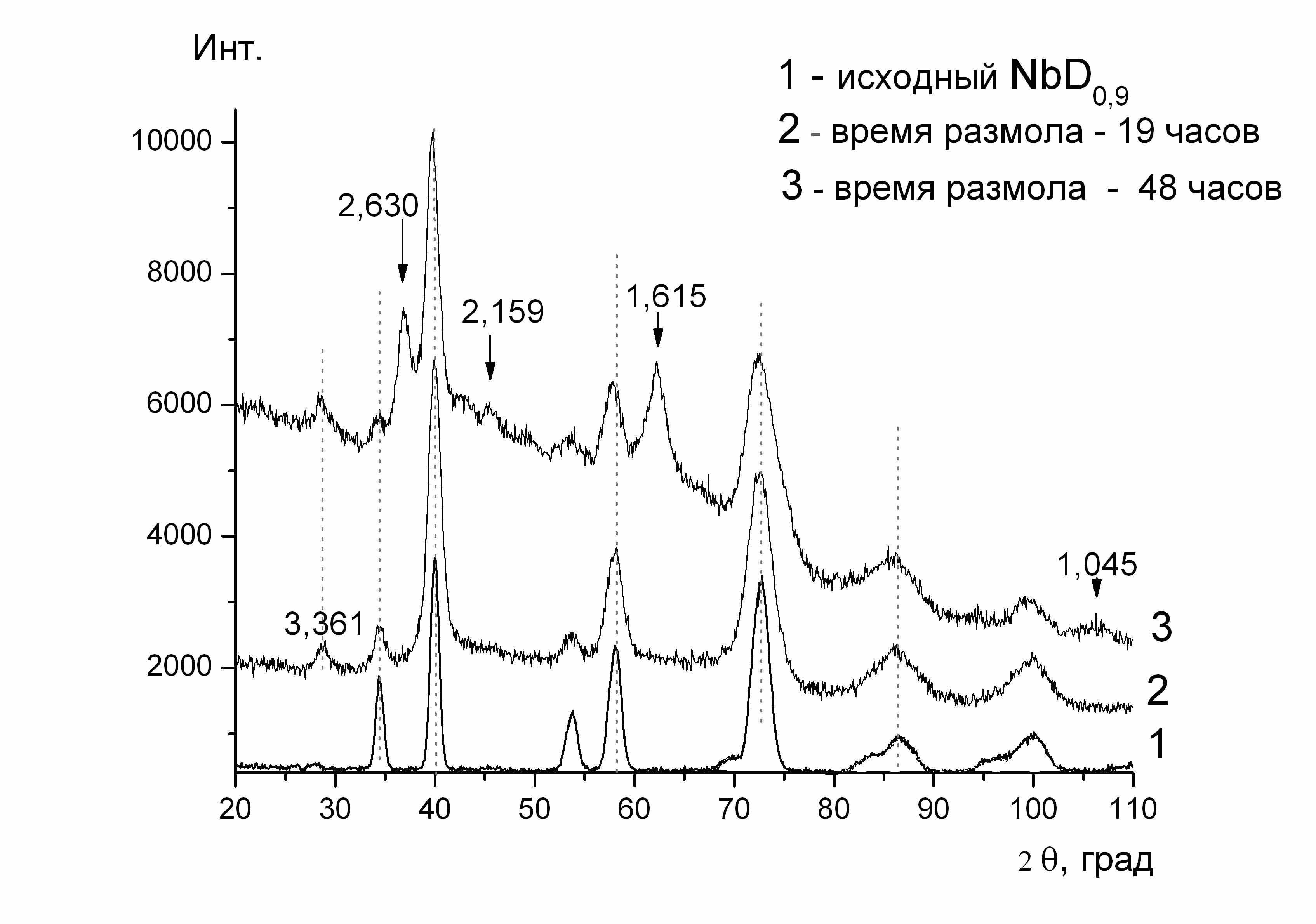


Рис. 2. Нейтронограмма дейтерида ниобия, подвергнутого размолу в шаровой мельнице.

Для ответа на вопрос о том, какие переходы возможны в металлических гидридах при уменьшении размеров частиц методом дифракции нейтронов и рентгеновских лучей исследованы хорошо изученные ранее дейтериды ниобия (NbD0.95 и NbD1.84), тантала TaD0.75 и ванадия VD0.5, подвергнутые механоактивации (размолу в шаровых мельницах на воздухе). Обнаружено, что при таком воздействии в NbD0.95 происходит существенное изменение дифракционной картины (рис.1): уширение пиков, исчезновение сверхструктурных пиков, соответствующих звезде волнового вектора (½½0), появление новых сверхструктурных пиков типа (100), а также расщепление структурных пиков с с/а ~ 1,07. Полученные результаты можно объяснить образованием упорядоченной фазы типа Ме2D с октаэдрической координацией атомов водорода и остаточного разупорядоченного дейтерида МеD, аналогично равновесной диаграмме состояния гидрида ванадия. Аналогичное изменение координации атомов водорода в NbD уже наблюдалось ранее с помощью синхротронного излучения при 10-20 ГПа и было предсказано при высоких давлениях для различных систем Ме-Н. Однако оценки показывают, что при размере частиц, возникающих в NbD0.95 при механоактивации, лапласово давление недостаточно для реализации перехода, так что причины перехода связаны, возможно, с влиянием газовых примесей. В NbD1.84, состоящем из NbD2 и примеси NbD0.9, при механоактивации происходит аморфизация NbD2, а в NbD0.9 - переходы, описанные выше. Ситуация, аналогичная NbD0.95, имеет место и в TaD0.75, а в VD0.5 на ранних стадиях размола происходит образование разупорядоченного дейтерида с ГЦК решеткой.

Изучена температурно-структурная эволюция аморфных сплавов при высоких давлениях (до 700 атм) и различных температурах в области стабильности аморфной фазы и обнаружено явление индуцированного водородом полиаморфного распада на гидриды компонентов с образованием метастабильного гидрида палладия с ОЦК структурой и аморфной фазы гидрида циркония (рис.2).

Ранее индуцированные водородом фазовые превращения в металлической матрице (упорядочение и распад) наблюдались только в кристаллических системах.

Явление распада аморфного сплава при наводораживании высоким газовым давлением можно объяснить различным сродством к водороду компонентов сплава, так что сначала при низких температурах и давлениях образуется менее устойчивый (PdHx), а затем (при более высоких температурах и давлениях - более устойчивый гидрид ZrDx, причем оба в метастабильной форме.

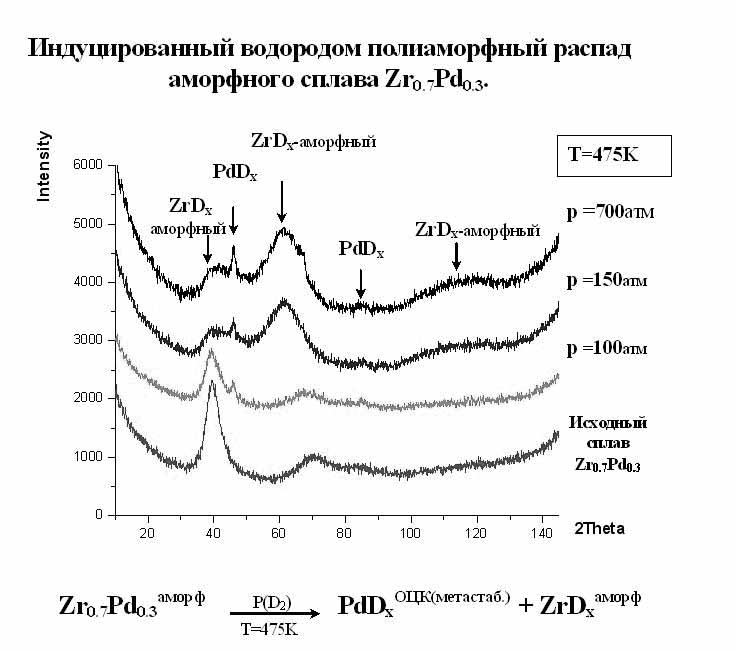


Рис.3. Нейтронограммы сплавов при Т=475К и различных давлениях дейтерия.

С помощью механоактивации получены образцы аморфных фуллеренов и изучена их структурная стабильность по отношению к температурным воздействиям. При высокотемпературном (600-1600К) отжиге аморфных фуллеренов обнаружен полиаморфный переход из молекулярного стекла в атомарное, сопровождающийся исчезновением фуллеренных гало при малых углах рассеяния (рис.3).

При изучении взаимодействия водорода под давлением >100 атм и температуре выше 4000С с аморфными фуллеренами было установлено образование кристаллической гидридной фазы, содержащей около 4 вес% водорода (примерного состава С2Н). Структура этой фазы по данным рентгеновской и нейтронной дифракции оказалась

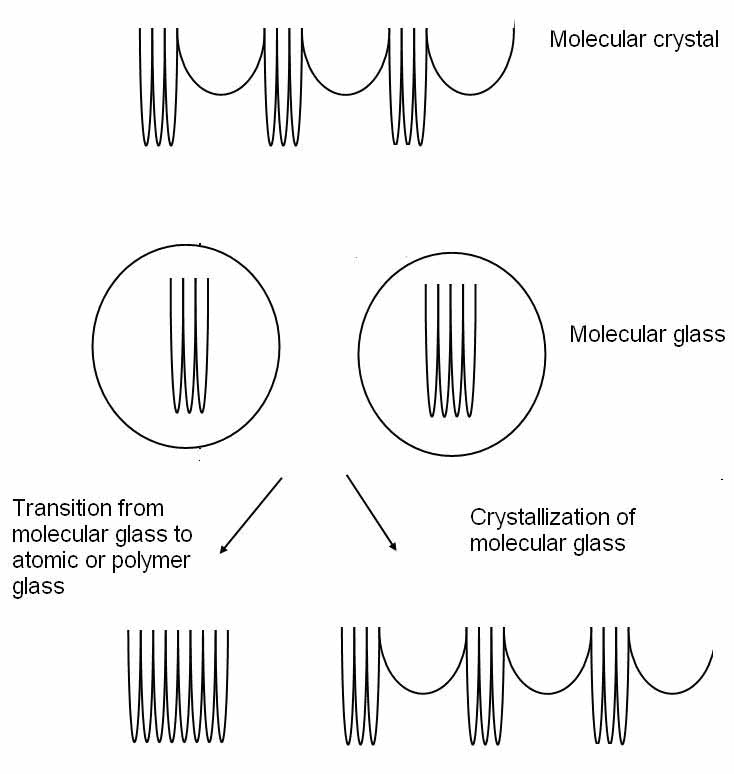
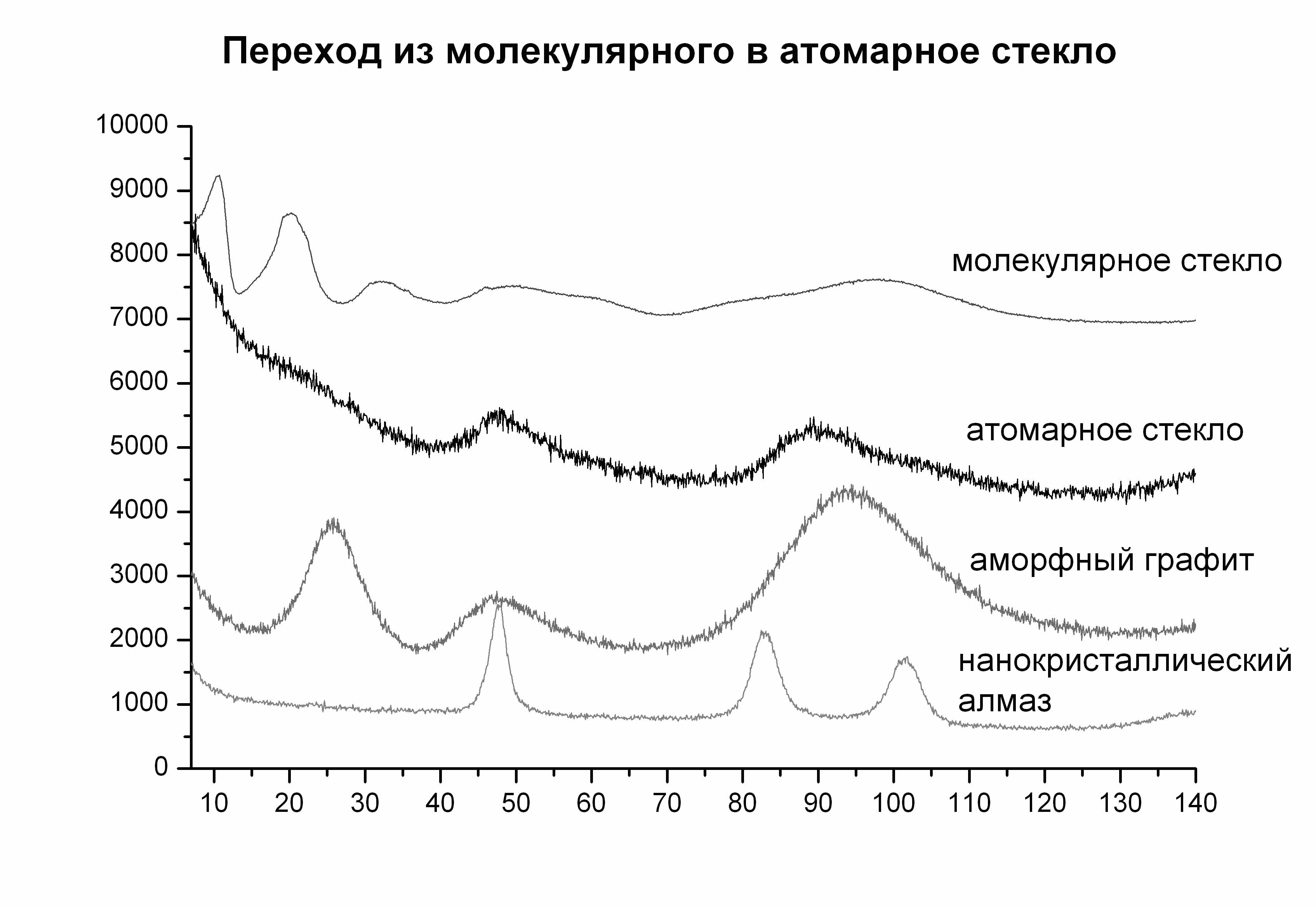


Рис.4. Переход из молекулярного стекла в атомарное графитоподобной с а ≈ 2агр, с ≈ сгр (аналогично интеркалатам щелочных металлов).

Фаза обладает ферромагнитными свойствами, обнаруживает линейное возрастание восприимчивости с температурой и довольно высокую коэрцитивную силу (НС>800 э). При этом в отличие от недавно обнаруженных ферромагнитных фаз высокого давления чистых и наводороженных фуллеренов ее структура и свойства остаются стабильными в течение, по крайней мере, 2-х лет. В то же время при взаимодействии аморфных фуллеренов с дейтерием возникает фаза с иной структурой и другими магнитными свойствами. С помощью нейтронрадиационного анализа обнаружено наличие Ni в некоторых магнитных образцах, что указывает на возможную примесную природу магнетизма.

Полученные результаты показывают, что в наноразмерных системах возможны фазовые переходы, изменение фазового состояния, фазовых границ и координации атомов отличные от превращений в кристаллических образцах.

Одним из наиболее эффективных способов модифицирования свойств материалов является их легирование. Однако его влияние на свойства сплавов ограничено, что связано с низкой растворимостью элементов в цинке. Применение сверхбыстрой закалки из расплава даёт возможность увеличить взаимную растворимость компонентов и тем самым усилить действие легирующих элементов [1]. В связи с этим представляет интерес исследовать влияние различных легирующих добавок на электрические свойства быстрозатвердевших цинковых сплавов.

Исследуемые в работе фольгиполучались сверхбыстрой закалкой из жидкой фазы инжектированием капли расплава (~ 0,2 г) на внутреннюю полированную поверхность быстровращающегося медного цилиндра с частотой 25 об/с. Для исследования использовались фольги толщиной от 30 до 80 мкм. Скорость охлаждения расплава, как показал расчет [2], была не менее 106 К/с.

На рис.1 представлены графики зависимости дифференциальной термо-ЭДС α от концентрации легирующего элемента.

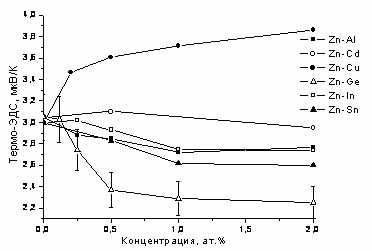


Рис. 5. Зависимость термо-ЭДС *α* фольг сплавов бинарных систем на основе цинка от концентрации легирующего элемента.

Проведенные исследования показали, что в фольгах сплавов на основе цинка в результате образования пересыщенного твердого раствора предел растворимости элементов увеличивается и достигает 1 ат.% [3]. Как видно, образование пересыщенного твердого раствора в фольгах при легировании цинка ведет к возрастанию значения *α* в сплавах системы Zn-Cu, не изменяет его значения при легировании цинка кадмием, и вызывает уменьшение термо-ЭДС в сплавах систем Zn-Al, Zn-In, Zn-Sn и Zn-Ge.

Известно, что для металлов с валентностью 2 поверхность Ферми пересекает границы зоны Бриллюэна. Это означает, что первая зона заполнена не полностью, и у границ зоны Бриллюэна имеется область свободных состояний или дырок, а во второй зоне имеются занятые состояния у границ первой зоны [4]. В этом случае вклад в дифференциальную термо-ЭДС вносят электроны и дырки, и его значение описывается в рамках двухзонной электронной модели соотношением [5]:

(1)



, (2)

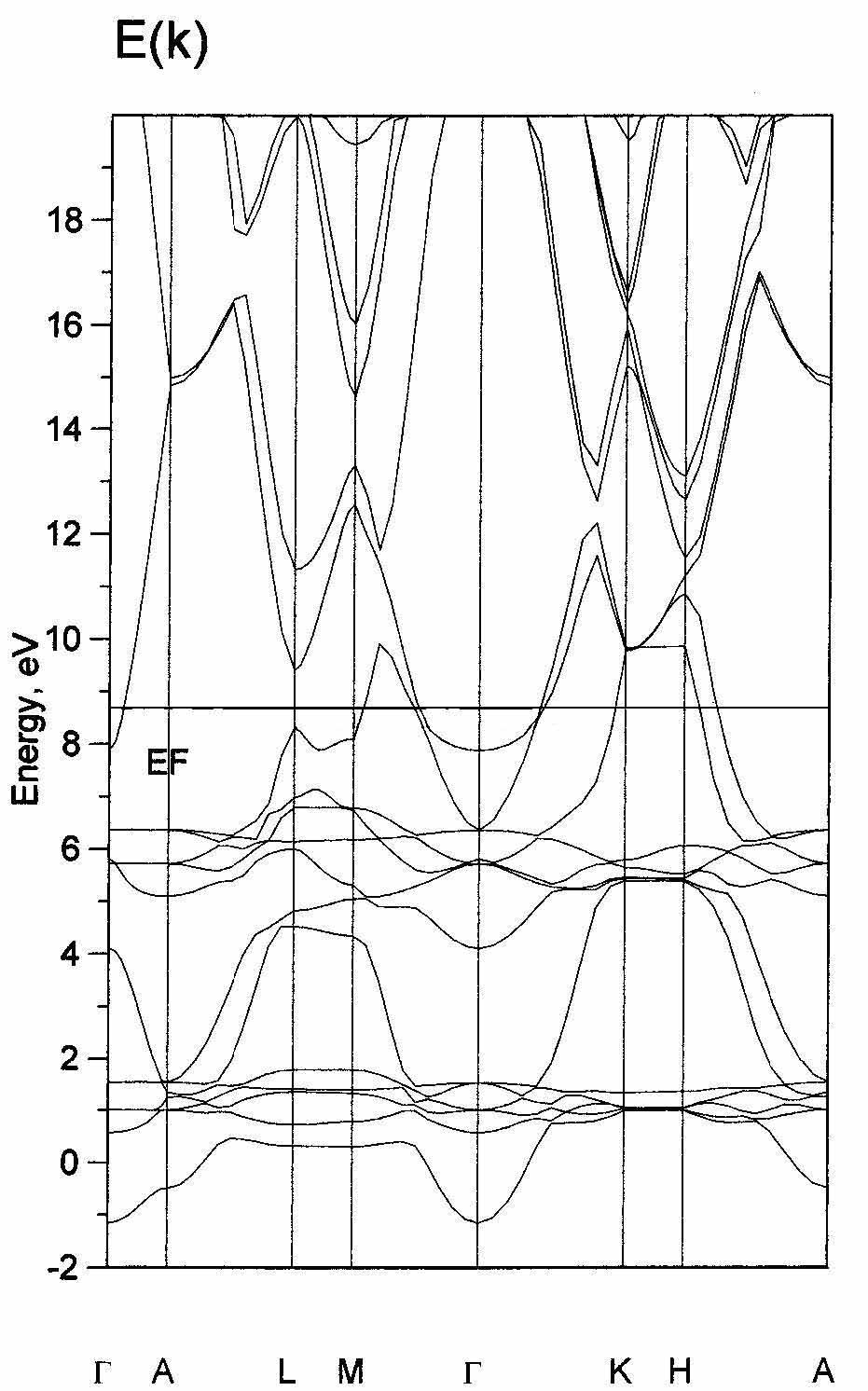
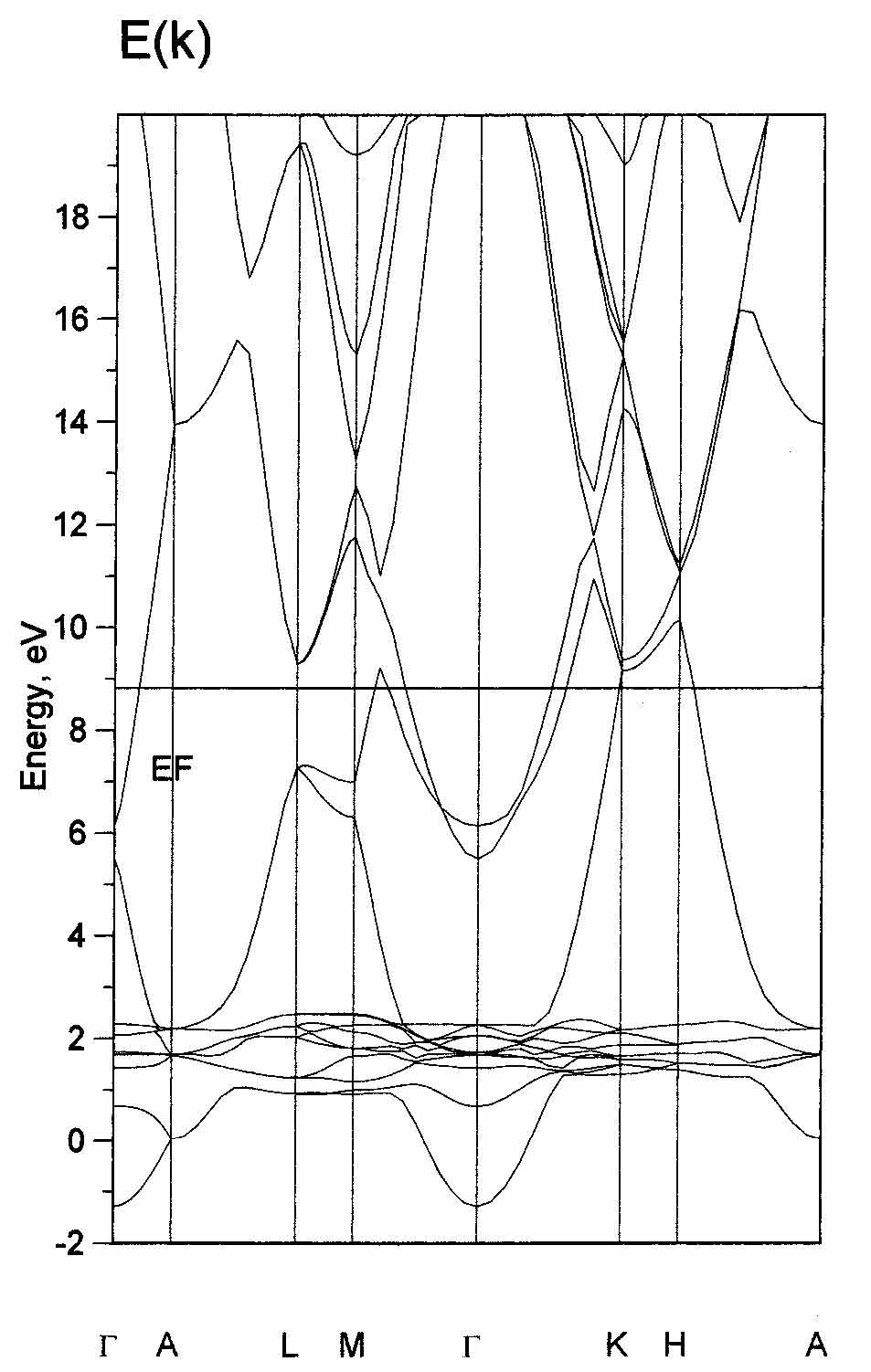


где , , , - парциальные термо-ЭДС и проводимости дырок и электронов, *ν*, *μ*- подвижность дырок и электронов, причем >0, <0.

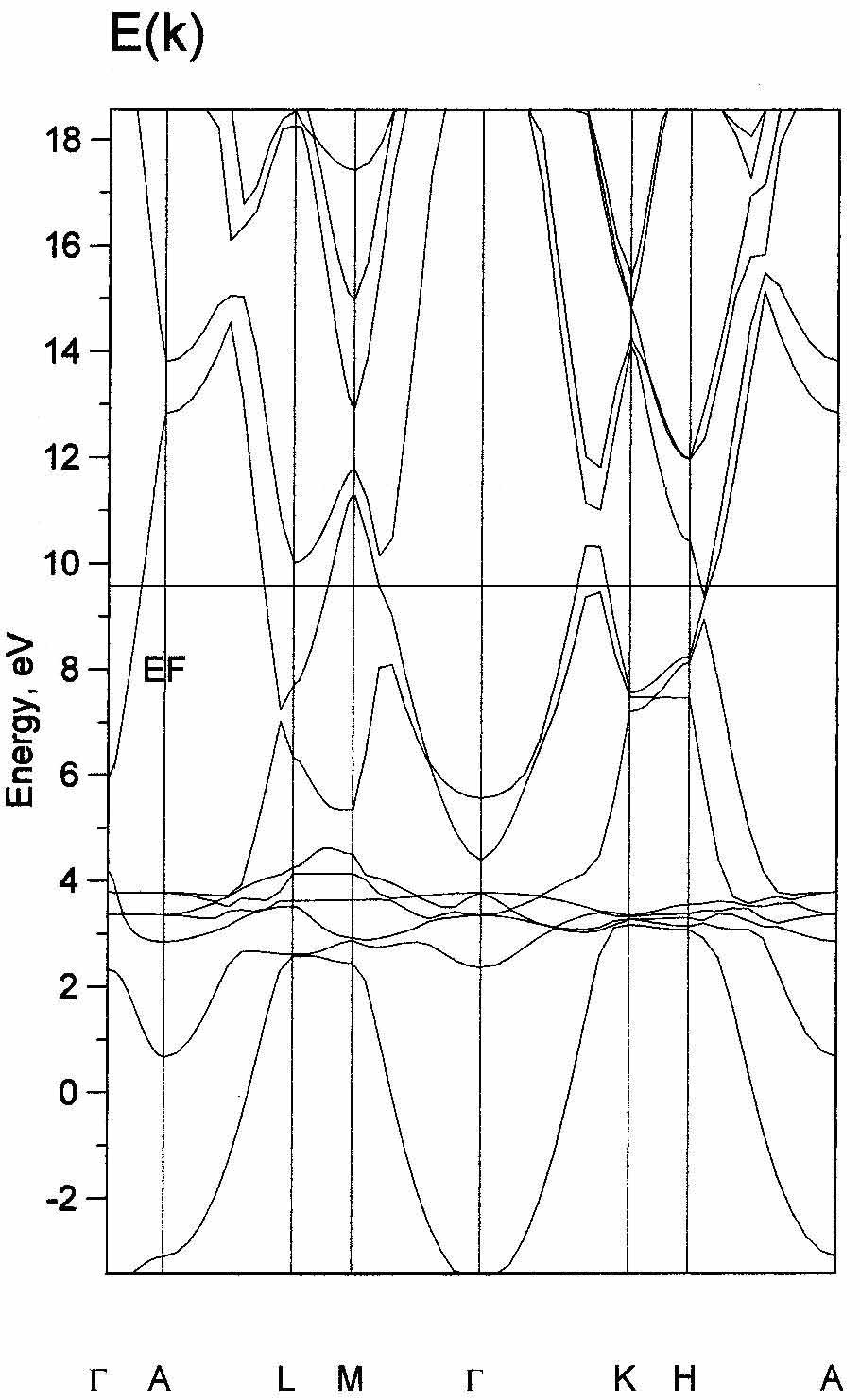
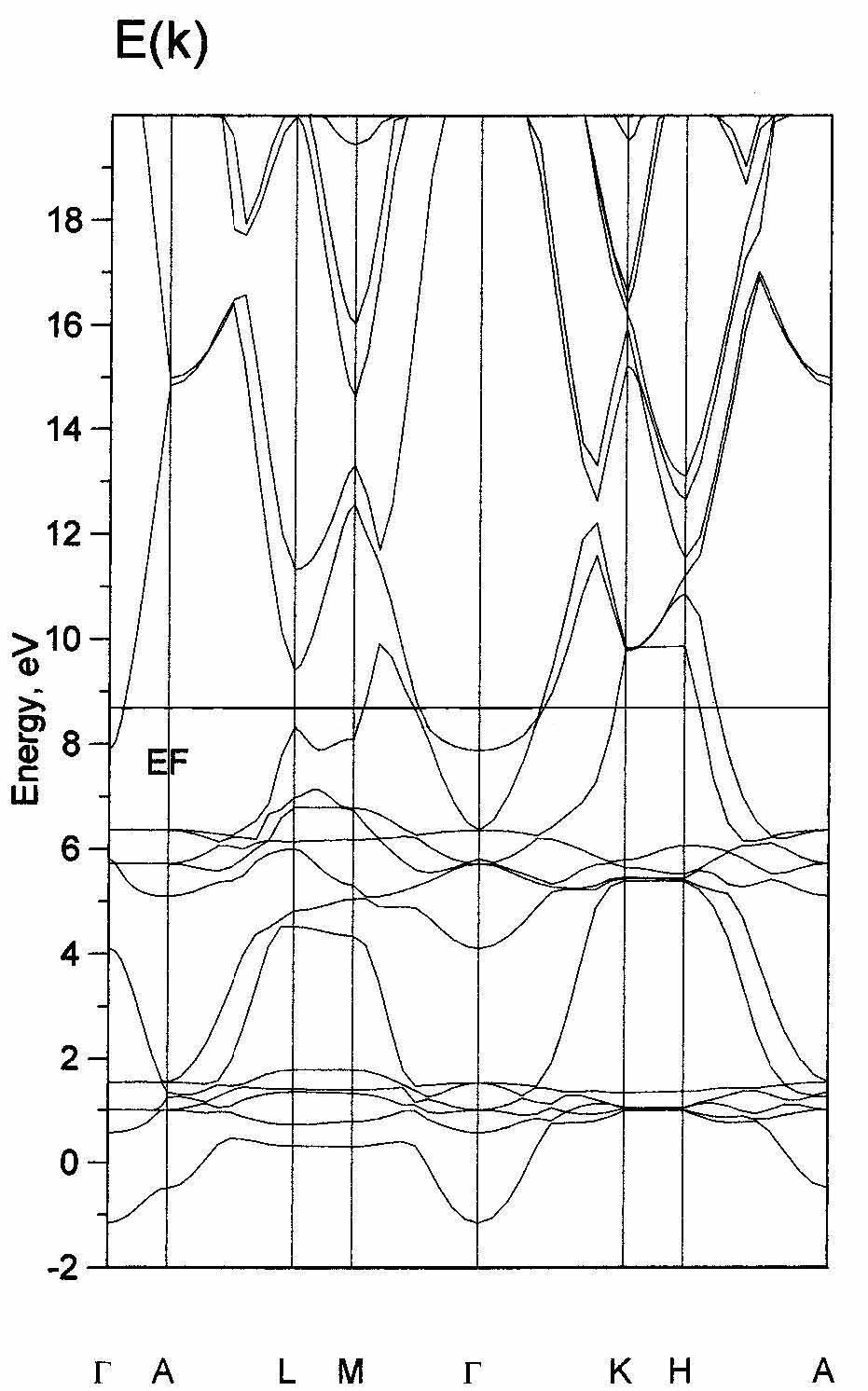


В рамках теории функционала плотности при использовании приближения FP LMTO (full potential linear muffin-tin orbital method) с помощью оболочки M-studio ''LMTART 6.20'' [6, 7] проведены расчеты зонной структуры для Zn и сплавов Zn-Cd, Zn-Cu, Zn-Al, Zn-In, Zn-Sn, Zn-Ge в основном состоянии.

Результаты расчетов (рис.2) показали, что легирование цинка индием и алюминием, а также германием и оловом, принадлежащим к III и IV группам периодической системы элементов Д.И. Менделеева соответственно, ведет к смещению уровня Ферми (ЕF) вглубь зоны проводимости по сравнению с ЕF для чистого цинка. Данный факт означает, что вклад, вносимый электронами в термо-ЭДС, возрастает, и модуль слагаемого *αnσn* в формуле (2) увеличивается. Это, в свою очередь, и приводит к уменьшению значения *α* в сплавах систем Zn-Al, Zn-In, Zn-Sn, Zn-Ge. При легировании цинка медью положение уровня Ферми понижается (рис.2 б), а значит, вклад дырок в термо-ЭДС возрастает. Исходя из формулы (1), значение *α* при этом также должно увеличиваться, что и подтверждается данными эксперимента (рис.1). Положение ЕF в сплавах системы Zn-Cd не изменяется при возрастании концентрации кадмия. При этом значение термо-ЭДС *α* этих сплавов также не изменяется.



а) б)



в) г)

а) - Zn; б) - Zn - 5 ат.% Cu; в) - Zn - 5 ат.% In; г) - Zn - 5 ат.% Sn;

Рис.6. Зонная структура цинка и его сплавов

Таким образом, образование пересыщенного твердого раствора в фольгах не изменяет значения термо-ЭДС α в сплавах системы Zn-Cd, ведет к возрастанию его значения при легировании медью. В сплавах систем Zn-Al, Zn-In, Zn-Sn и Zn-Ge наблюдается уменьшение термо-ЭДС вследствие изменения концентрации носителей заряда.

## Список литературы

1. В.А. Васильев, Б.С. Митин, И.Н. Пашков, М.М. Серов, А.А. Скуридин, А.А. Лукин, В.Б. Яковлев. Высокоскоростное затвердевание расплава (теория, технология и материалы). / Под ред. Б.С. Митина. СП интермет инжиниринг, М. (1998). 400 с.
2. И.С. Мирошниченко. Закалка из жидкого состояния. Металлургия, М. (1982). 168 с.
3. В.В. Лозенко, В.Г. Шепелевич. ФХОМ 4, 67 (2006).
4. А. Крэкнелл, К. Уонг. Поверхность Ферми. Атомиздат, М. (1978).352 с.
5. В.М. Драко, В.И. Прокошин, В.Г. Шепелевич. Основы фононных и электронных процессов в кристаллах. Гомельский центр науч.-техн. инф-ции, (1999). 248 с.
6. S.Y. Savrasov, D.Y. Savrasov. Phys. Rev. В46,864 (1992).
7. O.K. Andersen. Phys. Rev. В12, 3060 (1975).