**Локальное ферромагнитное упорядочение в кристаллах типа висмута**

В последние десятилетия активно исследуется магнитопластический эффект (МПЭ) в немагнитных кристаллах. Суть эффекта заключается в том, что однородное постоянное магнитное поле (МП) инициирует депиннинг дислокаций. Авторами было обнаружено [1], что длительное воздействие сосредоточенной нагрузки с одновременным приложением слабого постоянного магнитного поля (МП) частично подавляет двойникование в кристаллах висмута. Наиболее ярко это выражается в уменьшении длины клиновидных двойников. При этом существенно интенсифицируется конкурирующий вид пластической деформации – скольжение [2].

В обзоре [3] отмечается, что силовое действие МП на дислокационную линию на несколько порядков меньше уровня стартовых напряжений. Поэтому движущей силой для перемещения дислокации по кристаллу является случайная мозаика полей внутренних напряжений, а МП лишь снижает высоту барьеров, преодолеваемых дислокациями. Несколько групп исследователей, работающих в этом направлении, придерживаются теории спин-зависимого депиннинга дислокаций. Суть этой теории сводится к тому, что МП порождает эволюцию спинового состояния в системе дислокация-парамагнитный центр, приводящую к снятию спинового запрета на протекание внутрикристаллической химической реакции, что и приводит к откреплению дислокаций от парамагнитного точечного дефекта.

B работе [4] указывается, что в исходно диамагнитных веществах может возникать высокотемпературное магнитное упорядочение островкового типа («квазиферромагнетизм»). В этом случае можно ожидать силового взаимодействия между ферромагнитными островками и дислокациями, понижающего высоту потенциальных барьеров для дислокаций, движущихся в поле упругих напряжений, создаваемых индентором. Идея опыта по экспериментальной проверке данной модели физического механизма МПЭ состояла в следующем. Нами было обнаружено, что в образцах сурьмы МП индуцировало эффект последействия. Иначе говоря, предварительное воздействие на образец импульса МП (до приложения сосредоточенной нагрузки) приводит к снижению средней длины и увеличению числа клиновидных двойников. (Эффект последействия имеет место также и в случае скольжения [3]). Если островковое ферромагнитное упорядочение действительно ответственно за МПЭ в исходно диамагнитных кристаллах, то этот эффект должен исчезать, или, по крайней мере, значительно снижаться после «размагничивания» образца. Такое размагничивание мы осуществляли по стандартной методике, принятой в радиотехнике.

Клиновидные двойники системы {110}<001> получались путем вдавливания стандартной алмазной пирамиды в плоскость спайности (111) кристаллов сурьмы. Исследования проводились с помощью микротвердомера ПМТ-3 с использованием специального устройства, изготовленного из неферромагнитных металлов, для нагружения образца в условиях приложения к нему МП. Вектор магнитной индукции лежал в плоскости спайности (111) кристаллов висмута. Для размагничивания образцы помещались внутрь соленоида (не соприкасаясь) обмотка которого содержала 1800 витков для напряжения электросети 220 В. Затем образцы плавно удалялись на расстояние 1м от соленоида, после чего соленоид выключался. Промежуток времени после окончания воздействия импульса постоянного однородно МП был одинаков для всех образцов (размагничиваемых и не размагничиваемых). После снятия нагрузки проводилось фотографирование ансамбля клиновидных двойников у отпечатка алмазного индентора.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| Рис.1. Ансамбль клиновидных двойников заклинившихся у отпечатка индентора без воздействия МП | Рис.2. Ансамбль клиновидных двойников заклинившихся у отпечатка индентора после воздействия импульса МП |
|  |  |

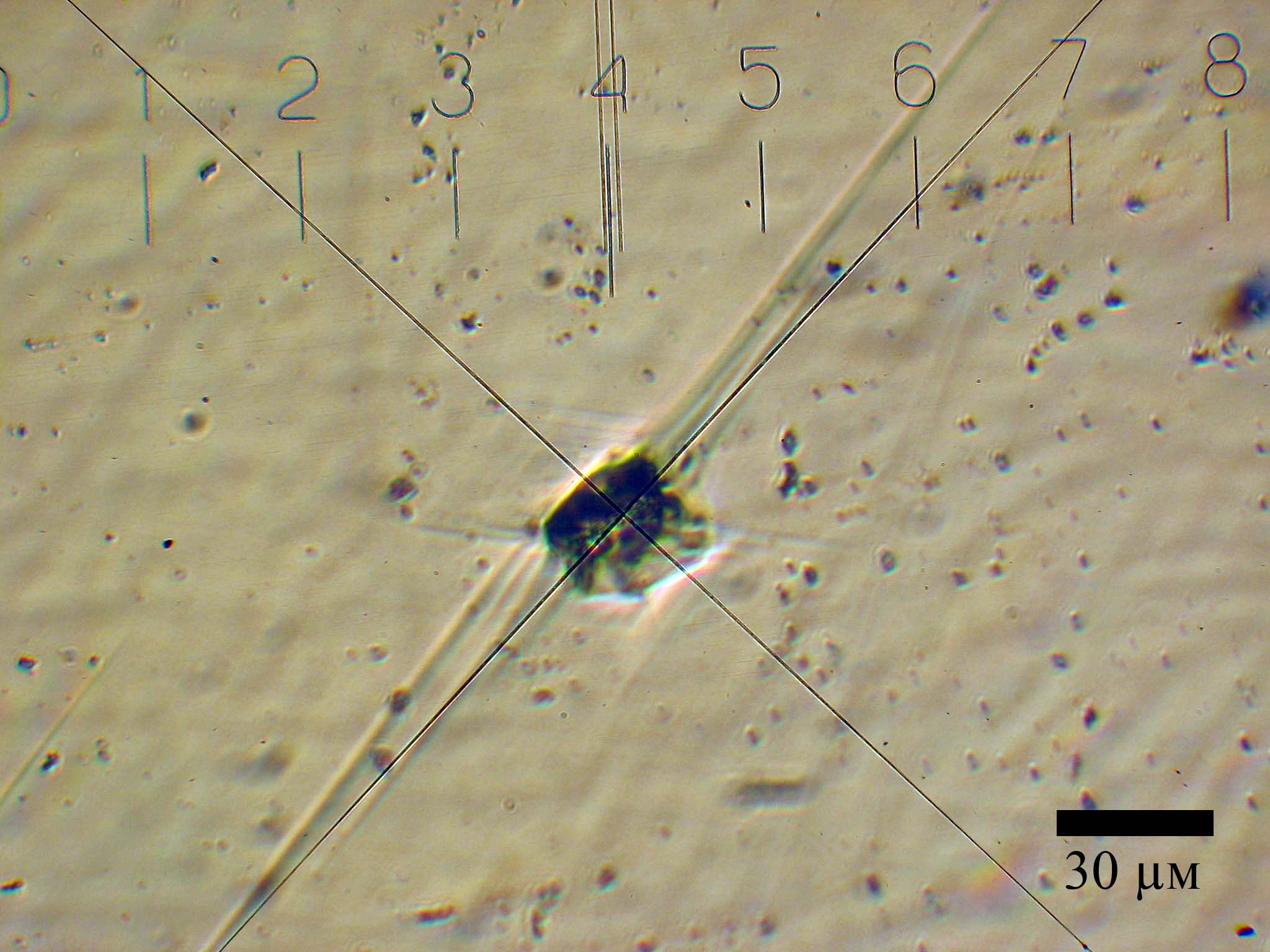


Рис.3. Ансамбль клиновидных двойников заклинившихся у отпечатка индентора после воздействия импульса МП и последующего «размагничивания» образца

Из изучения микрофотографий можно сделать вывод о том, что воздействие импульса постоянного однородного МП приводит к снижению средней длины клиновидных двойников и резкому росту числа двойников малой длины. Следовательно, МП снижает трансляцию двойникующих дислокаций вдоль готовых границ раздела двойник-матрица, но в тоже время стимулирует работу источников двойникующих дислокаций. «Размагничивание» образцов приводит к практически полному исчезновению эффекта – число и длина двойников в «размагниченных» кристаллах приближаются к значениям, которые имеют место без воздействия постоянного однородного МП. Таким образом, локальное ферромагнитное упорядочение может быть ответственно за МПЭ в диамагнитных кристаллах. Недавно [1] было показано, что в диамагнитно разбавленных сплавах Mn2-xZnxSb при больших концентрациях цинка, замещающего марганец в матрице Mn2Sb, наблюдается эффект фазового магнитного расслоения, т.е. существование двух неоднородных магнитных состояний при структурной однородности.

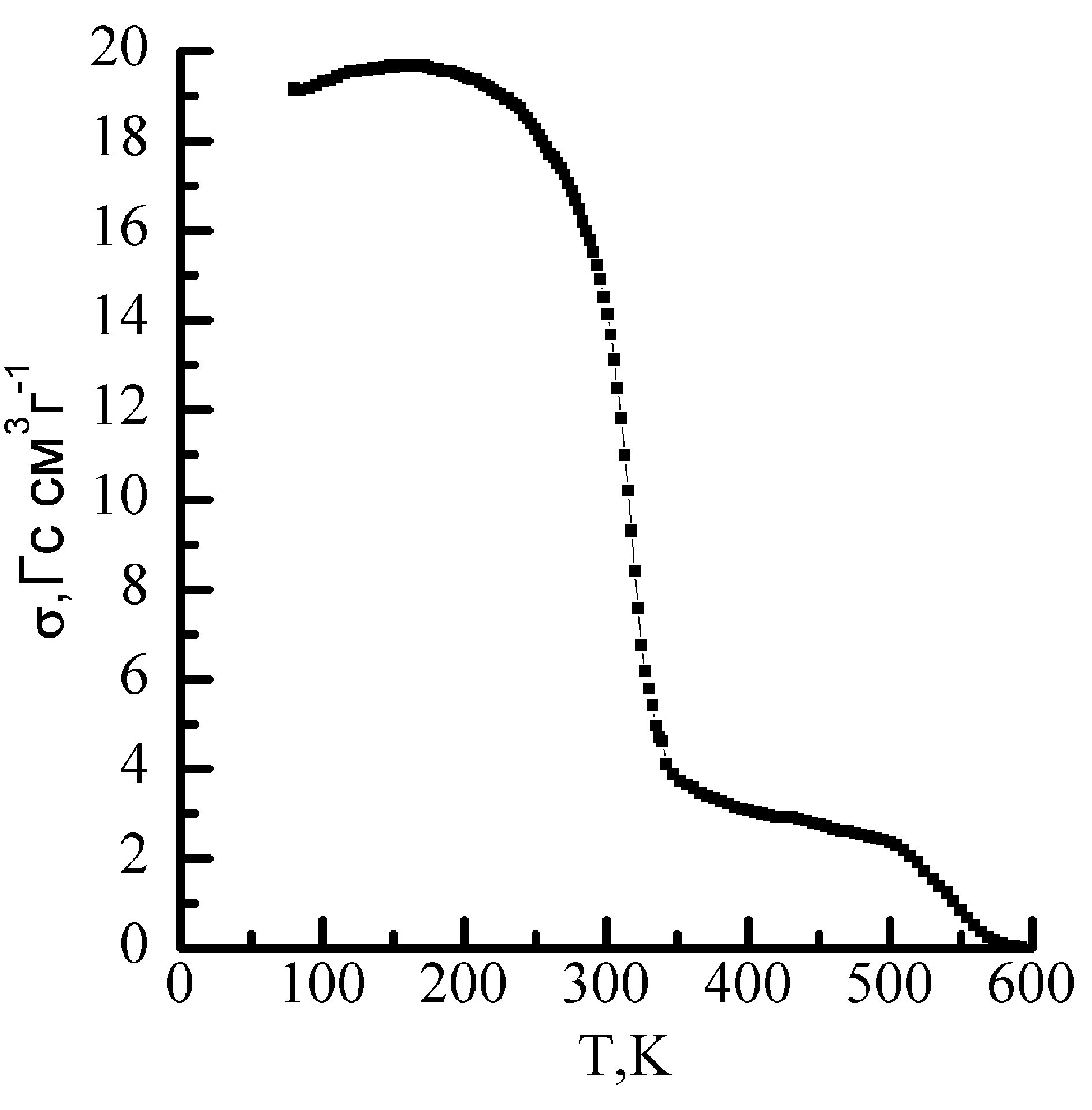


Рис. 4. Температурная зависимость удельной намагниченности сплава Mn1,2Zn0,8Sb в поле H=8.6 кЭ.

В сплавах реализуется однородная тетрагональная кристаллическая структура типа Cu2Sb (пространственная группа Р4/nmm, C 38). Однако данные магнитометрии демонстрируют необычный ход температурного поведения намагниченности – при резком уменьшении в области 300-350 К сохраняется значительная остаточная намагниченность до ~ 550 К. (рис. 1). Анализ экспериментальных данных рентгенографии и магнитометрии позволил сделать вывод о существовании в сплавах двухфазного магнитного состояния: 1) с ферромагнитным упорядочением атомов MnI (MnII замещен Zn); 2) с ферримагнитным упорядочением атомов MnI и незамещенных цинком атомов MnII, аналогичным реализующемуся в Mn2Sb. Температуры магнитного разупорядочения названных магнитных фаз различны (Т1≈320 К, Т2≈550 К) в силу различных атомных магнитных моментов образующих их атомов MnI и MnII и соответствующих межатомных расстояний. При этом высокотемпературная фаза 2 представляет собой кластеры, рассеянные в виде «капель» в основной матрице 1. Так как количество фазы 2 в исследованных сплавах значительно, возникают соприкасающиеся кластерные образования, что приводит к возникновению протяженных областей с когерентным магнитным порядком. Это дает возможность, в частности, идентифицировать и характеризовать такие области методом нейтронографии [2]. Отметим, что проведенные ЯГР-измерения также подтверждают эффект фазового магнитного расслоения в сплавах Mn2-xZnxSb [3].

В настоящем сообщении приводятся полученные нами результаты по влиянию сильных импульсных магнитных полей на диамагнитно разбавленный сплав Mn1,2Zn0,8Sb.

Поликристаллический образец для измерений был получен методом прямого сплавления порошков исходных компонентов в вакуумированных до 10-3 мм. рт. ст. кварцевых ампулах по технологии, апробированной ранее при синтезе антимонидов марганца, и аттестован рентгенографически как однофазный со структурой типа Cu2Sb.

Измерения полевых зависимостей намагниченности в ИМП проводились на основе индукционной методики при помощи импульсного магнитометра с длительностью полупериода импульса 1.5 миллисек [4].

Полевые зависимости удельной намагниченности сплава при различных температурах приведены на рис. 2. Зависимость σ=f(H) при Т=78 К имеет характер кривой намагничивания типичного ферромагнетика, основу которого в нашем случае представляет ферромагнитная матрица атомов MnI (фаза 1). Выход на магнитное насыщение сплава происходит при достаточно больших полях H ≥ 50 кЭ, что свидетельствует о сильной одноосной магнитокристаллической анизотропии в нем по аналогии с эквиатомным составом MnZnSb [5].

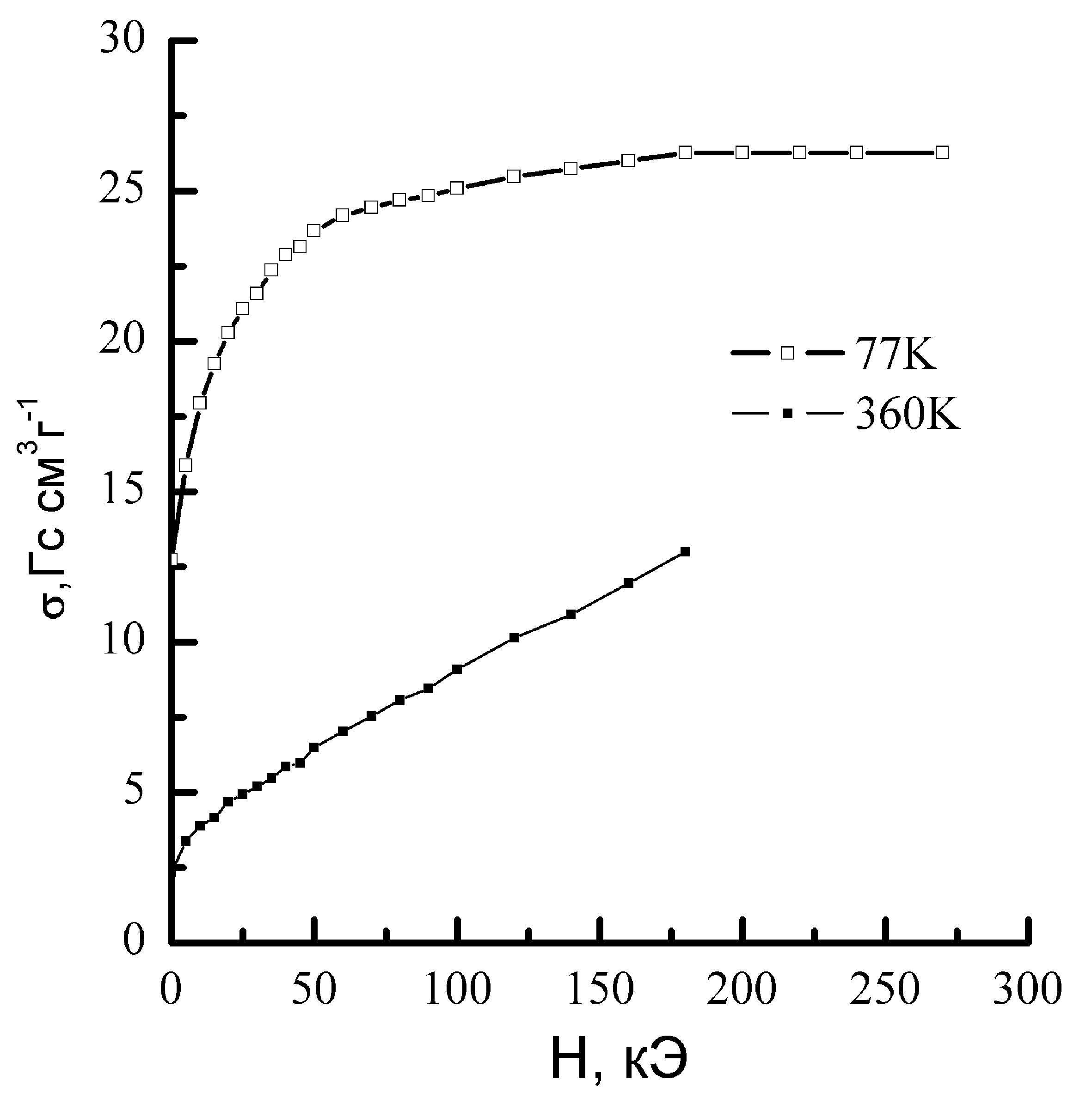


Рис. 5. Полевые зависимости удельной намагниченности сплава Mn1,2Zn0,8Sb.

При Т=360 К ферромагнитная матрица разупорядочена. Остаточная намагниченность определяется высокотемпературной кластерной фазой 2, образуемой магнитоактивными атомами MnI и MnII с антипараллельно направленными магнитными моментами. Намагниченность этой фазы линейно увеличивается с полем, магнитное насыщение не достигается вплоть до H=180 кЭ. Такая полевая зависимость характерна для систем магнитных моментов с неупорядоченной периодической структурой, таких как кластерные фазы, спиновые стекла и другие [6].

Таким образом, полученные результаты находятся в соответствии с экспериментальной моделью фазового магнитного расслоения в диамагнитно разбавленных сплавах Mn2(Zn)Sb, описанной в [1].

Работа поддержана Белорусским республиканским фондом фундаментальных исследований (проект Ф07К-054).

## Высококоэрцитивные пленки сплавов на основе кобальта привлекают внимание многих исследователей, занимающихся изучением магнитных сред для хранения и обработки информации [1]. Несмотря на значительное количество работ, посвященных изучению магнитных свойств покрытий, полученных в основном вакуумными методами, межкристаллитное магнитное взаимодействие, его связь с процессами перемагничивания изучены недостаточно, хотя такие исследования имеют большое практическое и научное значение [2]. В настоящей работе проведено исследование взаимосвязи структурных характеристик, магнитной неоднородности и межкристаллитного магнитного взаимодействия в по­крытиях Со-W (4 ÷ 6 ат.% W) и Со-Р (2÷5 ат.% Р), полученных электрохимическим осаждением при различных температурах (Со-W) и различной концентрации гипофосфита натрия в электролите (Со-Р). Пленки Со-W состоят из кристаллитов ГПУ кобальта различного типа: цилиндрического с текстурой [00.1] или пластинчатого с текстурой [10.0]. Доля кристаллитов того или иного типа зависит от условий электролиза, а сами кристаллиты распределяются по поверхности подложки практически равномерно, прорастая в основном на всю толщину покрытия [3]. Пленки Со-Р состоят из кристаллитов ГПУ фазы с преимущественной ориентацией [00.1]. При осаждении из электролита с концентрацией гипофосфита натрия 5 г/л покрытия состоят из агрегатов размером ~700 нм, объединяющих более мелкие кристаллиты размером 10 нм. Кристаллиты ориентированы преимущественно вдоль направления [00.1], одновременно наблюдается и текстура [10.0] [4].

Для анализа были выбраны такие структурно-чувствительные характеристики, как полевая зависимость необратимой восприимчивости χdirr=dId/dH, где Id-остаточная намагниченность образца после выключения отрицательного поля (предварительно образец был намагничен до насыщения положительным полем) и кривая δМ(Н)=Id(H)-(1-2Ir(H)), где Ir – остаточная намагниченность, полученная при последовательном намагничивании образца из размагниченного состояния. δМ-кривая (как и взаимное расположение кривых необратимой восприимчивости, полученных при намагничивании и размагничивании) характеризует тип взаимодействия магнитных составляющих покрытия (кристаллитов) (δМ(H) < 0 – магнитостатическое взаимодействие, δМ(H) > 0 - обменное взаимодействие или процессы смещения доменных границ) [2].

На кривых полевой зависимости восприимчивости χdirr(H), снятых на покрытиях Со-W со смешанной текстурой (осажденных при 26оС и 33оС) наблюдается два пика: первый−в полях ~ 32 кА/м, а второй − в полях ~ 48 кА/м, причем повышение температуры электролита приводит к относительному росту первого пика (Рис.). Дальнейшее повышение температуры электролита (свыше 33оС) приводит к росту только одного пика в области полей ~ 32 кА/м (кривые 4 и 5). Покрытие, полученное при Т=18°С, характеризуется одиночным пиком при ~ 16 кА/м. На кривых χdirr(H) покрытий Со-Р наиболее заметны два пика: в полях ~ 48 и 128 кА/м; первый заметно острее и выше второго. У образцов Со - 3ат.%Р происходит сдвиг первого пика в сторону больших полей (~64 кА/м), а второй пик исчезает. Покрытия Со-3.5 ат.% Р на кривой χdirr(H) имеют один довольно высокий и узкий пик в полях ~160 кА/м. Дальнейшее увеличение содержания фосфора в образцах вызывает снижение величины пиков в области полей ~ 160 кА/м и некоторый рост пиков в полях ~ 80 кА/м.

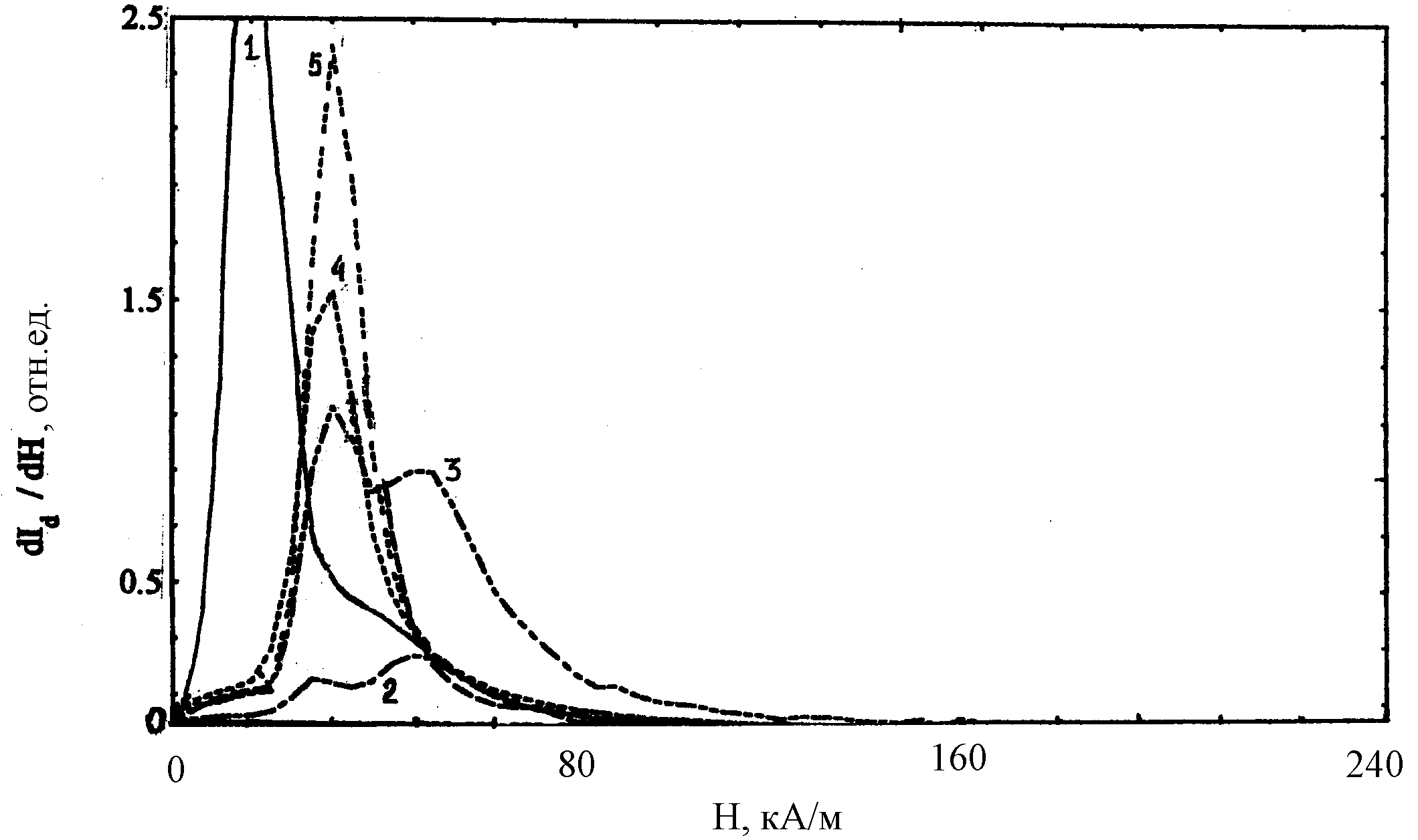


Рис.6. Кривые χdirr(H) покрытий Со-W (pH 6.4, h = 1мкм), полученных при различной температуре электролита, oС: 1−18, 2−26, 3−33, 4-37, 5−40.

Во всех исследованных покрытиях Со-W и Со-Р величина δМ(H)<0, что свидетельствует о магнитостатическом взаимодействии между магнитными составляющими покрытий [5,6]. Анализ кривых δМ(H) и χdirr(H) позволяет обнаружить связь процессов перемагничивания с текстурой и размером кристаллитов (агрегатоообразованием), опосредованную межкристаллитным магнитным взаимодействием. Прежде всего, появление двух пиков на кривых χd irr(Н) в покрытиях Со-Р и Со-W можно связать с присутствием в покрытии, наряду с основной текстурой [00.1] и текстуры [10.0]. Следует учитывать также, что исследуемые покрытия состоят из кристаллитов, между которыми существует магнитостатическое взаимодействие, которое в случае пленок Co-W с текстурой [00.1] обусловлено в основном вкладом элементов субструктуры сферической формы [7] и которое объясняет отличие процессов перемагничивания в реальных магнитных материалах от предсказанных теоретическими моделями [8,9]. Так, в покрытиях со смешанной текстурой [00.1]+[10.0] (cлабой текстурой [001]) пик χdirr(H), соответствующий перемагничиванию кристаллитов с текстурой [00.1] лежит правее пика χdirr(H), соответствующего перемагничиванию кристаллитов с текстурой [10.0]. Изменение структурных характеристик (текстуры, микроструктуры) при изменении концентрации в растворе гипофосфита натрия (пленки Со-Р) или температуры электролита (20-30о C,пленки Со-W) приводит лишь к росту или падению величины того или иного пика, но не вызывает их существенного сдвига на оси полей. Т.е. наличие магнитостатического взаимодействия элементов микроструктуры в плоскости образцов в этом случае приводит к вовлечению в процесс перемагничивания интегрального магнитного момента кристаллитов как единого целого, а не только его плоскостной составляющей, что с учетом хаотического распределения осей «С» кристаллитов в плоскости образцов и обусловливает расположение пика χdirr(H), соответствующего перемагничиванию кристаллитов с текстурой [10.0] , в области меньших полей.

Подтверждением влияния межкристаллитного взаимодействия на процессы перемагничивания может служить и тот факт, что характер зависимости необратимой восприимчивости от поля χdirr(Н) для образцов Со-2 ат.% Р и Со-3 ат.% Р различен [6], хотя увеличение числа кристаллитов с ориентацией [00.1] относительно невелико. В этом случае с повышением концентрации гипофосфита натрия в электролите происходит не только усиление текстуры [00.1] в покрытиях, но и разрушение крупных зерен-агрегатов (размером ~700 нм), сопровождающееся более равномерным распределением мелких кристаллитов (размером ~ 10 нм) с ориентацией [10.0] и [00.1], образованием межзеренных границ с малой намагниченностью и увеличением магнитостатического взаимодействия между ними.

Различие магнитного поведения пленок с текстурой [00.1] и [10.0], проявляется и при отжиге исследованных покрытий. Термообработка покрытий Co-W при относительно невысоких температурах (~0.1Тпл) способствует снижению концентрации и перераспределению дефектов кристаллического строения и переходу образцов в более равновесное состояние, когда элементы субструктуры практически сливаются в единое целое. Такое совершенствование столбчатой структуры (уменьшение магнитного разделения элементов субструктуры) вследствие снижения концентрации дефектов, разложения гидроокиси приводит к уменьшению вклада элементов субструктуры в результирующее магнитостатическое взаимодействие пленок с текстурой [00.1] (при незначительном вкладе взаимодействия столбчатых кристаллитов). У образцов с текстурой [10.0] и преимущественно пластинчатым строением кристаллитов совершенствование структуры в процессе отжига не приводит к существенному изменению характера их микроструктуры, чем и обусловлено практически неизменное магнитное разделение кристаллитов.

В пленках сплавов Со-Р совершенствование текстуры [00.1] с ростом температуры отжига сопровождается постепенным усилением магнитостатического взаимодействия между кристаллитами, при этом характер изменения кривых dId/dH после отжига отражает более однородное магнитное состояние отожженных образцов. В этом случае отжиг дефектов, в частности дефектов упаковки, увеличивает в кристаллитах объем ГПУ фазы с ориентацией [00.1]. Возможен также незначительный вклад роста зародышей, благоприятно ориентированных по отношению к основной текстуре электрокристаллизации. Выход фосфора и дефектов кристаллического строения на границы зерен усиливают их магнитное разделение. В процессе отжига образца с наиболее совершенной исходной текстурой [00.1] (I002/I100 = 20, Со-3.5 ат.%Р) практически не изменяется степень ее совершенства и изолированности кристаллитов, так как большая их часть имеет основную ориентацию [001] и более низкую концентрацию дефектов упаковки.

**Литература**

1. В.М Рыжковский, В.И Митюк. Доклады НАНБ **50**, 5, 53 (2006).
2. В.М Рыжковский, В.С. Гончаров, В.И Митюк, В.П. Глазков, В.А. Соменков. (в наст. сборнике).
3. В.И Митюк, В.М Рыжковский, Т.М. Ткаченко. Тезисы республиканской конференции «Современные научные проблемы физики конденсированных сред и астрономии», Брест, 19-20 апреля 2007 г.
4. А.Ф. Вуль, Б.М. Тодрис. Импульсный магнитометр для измерений в сильных магнитных полях под давлением.-Препринт ДонФТИ-88-23. Донецкий ФТИ. 27, (1988).
5. S. Mori, T. Kanomata, H. Yamauchi, S. Sakatsume, T. Kaneko. J. Appl. Phys. **32**, S32-3, 273 (1993).
6. J. Smit, G. Nieuwenhuys, L. Jongh. Sol. St. Communica