

53(048)

**НАУЧНАЯ ВЫЕЗДНАЯ СЕССИЯ ОТДЕЛЕНИЯ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ  
И АСТРОНОМИИ АКАДЕМИИ НАУК СССР  
( Свердловск, 21 — 22 апреля 1982 г.)**

21—23 апреля 1982 г. в Свердловске состоялась выездная научная сессия Отделения общей физики и астрономии АН СССР, посвященная 50-летию Ордена Трудового Красного Знамени Института физики металлов Уральского научного центра АН СССР. На сессии были заслушаны доклады:

*21 апреля*

1. Вступительное слово председателя Президиума УНЦ АН СССР академика С. В. Вонсовского.
2. Е. А. Туров. Нарушенная симметрия и элементарные возбуждения в твердых телах.
3. А. А. Самохвалов. Активное электрон-магнонное взаимодействие в магнитных полупроводниках.
4. И. М. Цидильковский. Бесщелевые полупроводники — новый класс веществ.
5. Я. С. Шур. Процессы перемагничивания магнито-одноосных высокоанизотропных ферромагнетиков.
6. Ю. А. Изюмов. Симметрия магнитоупорядоченных кристаллов и рассеяние медленных нейтронов.
7. С. К. Сидоров. Нейтронографическое исследование сплавов переходных металлов со смешанным обменным взаимодействием.
8. Б. Н. Гоцицкий. Неравновесное состояние дефектных упорядоченных кристаллов.
9. С. М. Клоцман. Структура, свойства и взаимодействия точечных дефектов и их влияние на радиационно стимулированные явления в металлах.

*22 апреля*

10. В. Д. Садовский. Структурная наследственность в сталях.
  11. В. В. Сагарадзе. Упрочнение аустенитных немагнитных сталей фазовым наклепом.
  12. В. И. Сюткина. Новые механизмы упрочнения упорядоченных сплавов.
  13. В. А. Трапезников. Исследование поверхностных слоев твердых тел методом электронной спектроскопии.
  14. В. Е. Щербинин. Магнитные, магнитоупругие и магнитоакустические методы неразрушающего контроля.
  15. М. Н. Михеев. О научной деятельности Института физики металлов УНЦ АН СССР.
- Краткое содержание докладов публикуется ниже.

53:546(048)

**Е. А. Туров.** Нарушенная симметрия и элементарные возбуждения в твердых телах. Понятие спонтанно нарушенной симметрии (СНС) является одним из важнейших понятий теории элементарных частиц (ТЭЧ) на ее пути к созданию единой теории поля, объединяющей различные силы природы. Хотя понятие СНС пришло в эту теорию из ФТТ, связанные с ним представления получили здесь настолько существенное развитие, что в ряде случаев полезно снова применить такие представления к рассмотрению явлений ФТТ<sup>1-4</sup>.

Известна аналогия между механизмом Хиггса возникновения массы в ТЭЧ и эффектом Майсснера в теории сверхпроводимости Гинзбурга — Ландау<sup>5</sup>. Оба эффекта являются следствием СНС в системе, состоящей из двух взаимодействующих подсистем. Похожая в этом смысле ситуация встречается в ФТТ весьма часто. С этих позиций можно рассмотреть существование акустических и оптических мод колебаний

в решетке с базисом, или в многоподрешеточном магнетике, а также спектр связанных колебаний электронных и ядерных спинов в магнитоупорядоченных кристаллах. Однако основное внимание в докладе уделяется спектру связанных магнитоупругих (МУ) колебаний в таких кристаллах. СНС при магнитном упорядочении с учетом спонтанных МУ деформаций приводит к тому, что даже в изотропном магнетике (и при  $H \rightarrow 0$ ) одна из ветвей спектра (квазимагнонная) приобретает щель, а связанная с ней квазифононная ветвь размягчается так, что соответствующий ей упругий модуль обращается в нуль. Эффект МУ щели, аналогичный в указанном смысле эффекту Хиггса, был открыт экспериментально<sup>6</sup> и объяснен теоретически<sup>6,7</sup> даже раньше эффекта Хиггса.

В анизотропных магнетиках МУ эффекты СНС в чистом виде проявляются лишь вблизи точек магнитных (ориентационных) фазовых переходов, в которых основное состояние системы оказывается или квазивырожденным, или неустойчивым. Рассмотрены ФП по температуре, полю и давлению в ферро- и антиферромагнетиках различного типа<sup>3</sup>.

Рассмотрены также эффекты, связанные с нарушением трансляционной симметрии, которые обусловлены доменными границами (ДГ) в магнитных кристаллах<sup>1,2,8</sup>. Предсказаны новые МУ резонансы ДГ, резонансная генерация гиперзвука осциллирующими ДГ и пр.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Туров Е. А., Луговой А. А. Препринт ИФМ УНЦ АН СССР № 79/1.— Свердловск, 1979; ФММ, 1980, т. 50, с. 717.
2. Туров Е. А., Taluts G. G., Lugovoi A. A.— J. MMM, 1980, v. 15—18, p. 582.
3. Туров Е. А., Шавров В. Г. Препринт ИФМ УНЦ АН СССР № 81/1.— Свердловск, 1981.— (В этой статье дана полная библиография.)
4. Туров Е. А.— В кн.: Электронная структура и свойства твердых тел. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1982.— С. 49.
5. Киржниц Д. А.— УФН, 1978, т. 125, с. 169.
6. Боровик-Романов А. С., Рудашевский Е. Г.— ЖЭТФ, 1964, т. 47, с. 2095.
7. Туров Е. А., Шавров В. Г.— ФТТ, 1965, т. 7, с. 217.
8. Туров Е. А., Луговой А. А.— Письма ЖЭТФ, 1980, т. 31, с. 308.

537:311.32(048)

**А. А. Самохвалов.** Активное электрон-магнонное взаимодействие в магнитных полупроводниках. В докладе сообщалось о возбуждении магнонов носителями тока в магнитных полупроводниках — новых явлениях активного электрон-магнонного взаимодействия, обнаруженных при экспериментальном исследовании магнитных полупроводников типа  $\text{EuO}$  и  $\text{CdCr}_2\text{Se}_4$  в сильных электрических полях. Теория этих явлений предсказывает усиление спиновых волн, черенковскую генерацию магнонов<sup>1</sup>, их разогрев дрейфующими носителями тока<sup>2</sup>. Экспериментально обнаружены черенковская генерация магнонов, приводящая к пороговому уменьшению электропроводности при превышении скорости дрейфа носителей наименьшей фазовой скорости спиновых волн, разогрев носителей тока, сопровождающийся нелинейностями вольтамперной характеристики<sup>3</sup>, разогрев магнонов, приводящий к уменьшению намагниченности<sup>4,5</sup>.

Заключено, что изложенные результаты по возбуждению магнонов горячими носителями тока являются первыми, но обнадеживающими шагами в направлении к новой области прикладной физики твердого тела на основе магнитных полупроводников — полупроводниковой магнитоэлектронике с новыми возможностями для современной электронной техники.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ахизер А. И., Барьяхтар В. Г., Пелетминский С. В.— ЖЭТФ, 1963, т. 45, с. 337.
2. Коренблит И. Я., Танхилевич Б. Г.— ФТТ, 1976, т. 18, с. 62.
3. Самохвалов А. А., Осипов В. В., Калинин В. Т., Аминов Т. Г.— ФТТ, 1978, т. 20, с. 595.
4. Самохвалов А. А., Осипов В. В., Калинин В. Т., Аминов Т. Г.— Письма ЖЭТФ, 1978, т. 28, с. 413.
5. Самохвалов А. А., Осипов В. В., Иваев А. Т., Калинин В. Т., Аминов Т. Г.— Ibid., 1979, т. 30, с. 658.

10 УФН, т. 138, вып. 2

517.311.33(048)

**И. М. Цидильковский.** Бесщелевые полупроводники — новый класс веществ. Принципиальная возможность существования бесщелевого энергетического спектра электронов была предсказана в 1934 г. С. П. Шубиным и С. В. Вонсовским. В 1955 г. было установлено, что HgTe является бесщелевым полупроводником. Бесщелевое состояние в кристаллах HgTe, HgSe и твердых растворах на их основе есть следствие вырождения электронной и валентной зон в центре зоны Бриллюэна Г. Это вырождение обусловлено кубической симметрией кристалла и может быть снято лишь возмущением более низкой симметрии — магнитным полем или одноосным напряжением. Важнейший параметр электронной структуры — энергетический зазор  $\epsilon_g$  между ближайшими зонами Г<sub>6</sub> (s-типа) и Г<sub>8</sub> (p-типа) — зависит от давления  $P$ , температуры  $T$  и содержания элемента  $x$  в кристаллах Hg<sub>1-x</sub>A<sub>x</sub>S (A — элемент II группы или другой атом с изоэлектронной валентной оболочкой, S, Se, Te). Под этими внешними воздействиями электронный спектр претерпевает существенные изменения вплоть до инверсии зон Г<sub>6</sub> и Г<sub>8</sub>, что соответствует переходу от бесщелевого (БП) к обычному полупроводнику. Квантующее магнитное поле, снимая вырождение зон Г<sub>8</sub>, открывает щель  $\delta(H)$ , т. е. также вызывает переход БП-полупроводник. Величина  $\delta(H)$  может достигать больших значений при малых  $|\epsilon_g|$ . Таким образом, при соответствующей комбинации внешних воздействий ( $P$ ,  $x$ ,  $H$ ) достижимы экспериментальные условия, когда возможны исследования физических эффектов, обусловленных перестройкой электронного спектра. Инструментом исследования служили явления переноса. Ниже резюмируются наиболее существенные результаты изучения электронных переходов в БП, полученные в лаборатории полупроводников ИФМ в 1978—1984 гг.

1. Переход БП-полупроводник в магнитном поле сопровождается вымораживанием электронов из зоны проводимости на примесные уровни или в валентную зону. Обусловленный вымораживанием экспоненциальный рост продольного магнитосопротивления  $\rho_{zz}$  исследован у HgTe, Hg<sub>0,9</sub>Cd<sub>0,1</sub>Te, Hg<sub>0,85</sub>Cd<sub>0,15</sub>Te. Классифицированы возможные типы эффекта вымораживания и сформулированы условия, при которых по экспоненциальному ходу  $\rho_{zz}(H)$  можно определить зонные параметры.

2. Показано, что традиционный метод исследования концентрации электронов — эффект Холла — в БП оказывается недостаточным, ибо явления переноса определяются вкладом двух или трех типов носителей тока с заметно различающимися подвижностями. Конкуренция вкладов высокоподвижных электронов зоны проводимости и низкоподвижных носителей валентной или акцепторной зон вызывает аномалии температурных и магнитополевых зависимостей проводимости и эффекта Холла (например, двойную инверсию коэффициента Холла в p-HgCdTe). При  $T < 5$  К обнаружено резкое увеличение проводимости, вызванное уменьшением числа рассеивающих заряженных акцепторов, которые при понижении температуры образуют с донорами квазинейтральные комплексы.

3. При переходе БП-полупроводник, связанном с изменением содержания Cd в HgCdTe, значительно меняется  $g$ -фактор электронов и, следовательно, картина квантовых осцилляций. Показано, что в полупроводниках, где электроны в зоне Г<sub>6</sub>,  $g$ -фактор определяется взаимодействием с ближайшими зонами Г<sub>7</sub> и Г<sub>8</sub>, тогда как у БП в  $g$ -фактор электронов зоны Г<sub>8</sub> значительный вклад вносят далекие зоны.

4. В области сильных магнитных полей и низких температур  $\delta(H) \gg kT$  обнаружен второй экспоненциальный рост  $\rho_{zz}(H)$  и  $\rho_{xx}(H)$ . Он соответствует переходу от металлической проводимости по примесной зоне к прыжковой. По существу это обратный переход Мотта, индуцированный магнитным полем, которое сжимает волновые функции связанных на примесях электронов и уменьшает двухцентровый интеграл перекрытия. Закономерности прыжковой проводимости в БП исследованы на кристаллах HgCdTe и HgMnTe.

5. Качественно новый тип электронных переходов имеет место в БП HgMnTe, содержащих магнитные атомы замещения. Обменное взаимодействие зонных электронов с d-электронами Mn приводит к сдвигу  $\delta_{обм}$  валентной зоны вверх, который пропорционален магнитному моменту системы d-электронов. Для HgMnTe добавка  $\delta_{обм}$  пропорциональна функции Бриллюэна, т. е. линейна в слабых и стремится к насыщению в сильных полях.

Таким образом, в магнитном поле сначала возникает перекрытие валентной зоны с зоной проводимости (переход БП-полуметалл), которое в достаточно сильных полях  $\delta(H) \geq \delta_{обм}$  снимается, вызывая переход полуметалл — полупроводник. Описанные электронные переходы исследованы для Hg<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub>Te с  $0,02 \leq x \leq 0,07$ .

Таким образом, обнаружены и исследованы новые типы электронных переходов и аномалии кинетических эффектов, обусловленные бесщелевым состоянием.

## ЛИТЕРАТУРА

- Гирнат В., Нейфельд Э. А., Цидильковский И. М.— ФТП, 1975, т. 9, с. 188.
- Городилов Н. А., Нейфельд Э. А., Харус Г. И., Цидильковский И. М.— ФТП, 1980, т. 14, с. 2357.
- Арапов Ю. Г., Поникаров Б. Б., Цидильковский И. М., Шелушнина Н. Г.— ФТП, 1979, т. 13, с. 684, 1932.
- Поникаров Б. Б., Цидильковский И. М., Шелушнина Н. Г.— ФТП, 1981, т. 15, с. 380.
- Давыдов А. Б., Поникаров Б. Б., Цидильковский И. М.— Ibid., 5; Phys. stat. sol. scr. 1980, v. 101, p. 127.
- Глузман Н. Г., Щенников В. В.— ФТП, 1979, т. 21, с. 3192.
- Щенников В. В., Гавалешко Н. П., Глузман Н. Г., Паранчич Л. Д.— ФТП, 1980, т. 22, p. 2868.
- Щенников В. В., Глузман Н. Г.— ФТП, 1982, т. 16.
- Цидильковский И. М., Щенников В. В., Глузман Н. Г.— Ibid.
- Арапов Ю. Г., Ахмедова Ф. И., Давыдов А. Б., Цидильковский И. М.— Ibid., с. 54.
- Арапов Ю. Г., Цидильковский И. М., Шелушнина Н. Г.— Ibid., с. 266.
- Глузман Н. Г., Пономарев А. И., Потапов Г. А., Сабирзянова Л. Д., Цидильковский И. М.— ФТП, 1978, т. 12, с. 468.

538.221.(048)

**Я. С. Шур.** Процессы перемагничивания магнитоодноосных высокоанизотропных ферромагнетиков. Интерес к этому классу ферромагнетиков вызван тем, что в последние годы среди них обнаружены сплавы, из которых получены лучшие современные постоянные магниты.

Высокоанизотропность выражается в том, что кристалл любой формы после предварительного намагничивания не размагничивается под действием собственного размагничивающего поля. Это имеет место, когда  $K \gg 2I_s^2$ , где  $K$  — константа магнитной анизотропии, а  $I_s$  — намагниченность насыщения. В этом случае в магнитоодноосных кристаллах  $H_c = 2K/J_s = H_a$ , где  $H_c$  — коэрцитивная сила, а  $H_a$  — поле магнитной анизотропии. Однако экспериментально это не подтверждается, так как  $H_c < H_a$ . Так, в лучшем современном сплаве для постоянных магнитов  $\text{SmCo}_5$  величина  $H_a \sim 400$  кЭ, в то время как наивысшая экспериментально достигнутая величина  $H_c \sim 50$  кЭ.

В лаборатории ферромагнетизма ИФМ в течение ряда лет изучались причины такого несоответствия. Наибольший успех был достигнут при исследовании магнитных свойств монокристаллических пленок соединения  $\text{MnBi}$ . На этих пленках изучалась с помощью магнитооптического эффекта Керра доменная структура, которая сопоставлялась с измеренными на этих же образцах кривыми намагничивания и с частными и полными петлями гистерезиса. На некоторых образцах были установлены следующие закономерности. В размагниченных кристаллах наблюдалась многодоменная структура. При приложении поля  $H_1$ , не доводящего до исчезновения доменной структуры, и его выключения, происходило обратимое смещение границ доменов. Это указывает на бездефектность кристалла. И, следовательно, при циклическом изменении поля  $H_1$ , не возникали петли гистерезиса. Однако если в намагничивающем поле  $H_2 > H_1$  доменная структура полностью исчезает, то перемагничивание происходит в больших полях, равных  $H_a$ . При этом петля гистерезиса имеет прямоугольную форму и кристалл перемагничивается одним скачком. Приведенный в такое состояние образец уже невозможно размагнитить одним полем. Таким образом, на этих кристаллах впервые показано, что в бездефектных кристаллах  $H_c = H_a$ . В других пленочных кристаллах  $\text{MnBi}$  уже в слабых полях наблюдалась узкая петля гистерезиса. По мере возрастания намагничивающего поля и последующего его перемагничивания наблюдалось скачкообразное перемагничивание. Поля, при которых происходят эти скачки, с увеличением намагничивающего поля возрастают. Поле предельного скачка значительно меньше поля анизотропии. Такая зависимость поля скачка вызвана тем, что в кристалле сохраняются остаточные зародыши перемагничивания, обладающие различной устойчивостью к перемагничивающему полю.

На монокристалле ортоферрита самария было показано экспериментально путем наблюдения структуры, что остаточные зародыши могут закрепляться на структурных дефектах кристалла. Таким образом, основной причиной того, что в кристаллах  $H_c < H_a$ , является наличие в них микроскопических дефектных участков с пониженным значением  $K$ , которые благодаря их малому объему, не обнаруживаются при изме-

рениях  $K$ . В этих микрообъемах образуются зародыши перемагничивания двух типов. А: зародыши, возникающие в процессе намагничивания — остаточные зародыши, которые при перемагничивании разрастаются путем смещения границ и поэтому размагничивают кристалл в полях, меньших  $H_a$ . Б: зародыши перемагничивания, возникающие при снижении поля, предварительно намагничивают кристалл в том месте, где понижена  $K$ . Подтверждением различной природы частных и предельных скачков намагничиванности является их температурный ход: поле предельных скачков изменяется более резко с температурой, чем поле частных скачков. Это подтверждается также теоретически, так как температурную зависимость частных скачков можно описать по теории включения, а предельных — при помощи модели зародышеобразования.

## ЛИТЕРАТУРА

- Шур Я. С., Глазер А. А., Гасс В. Г.— ФТТ, 1975, т. 17, с. 976; ДАН СССР, 1974, т. 249, с. 67.  
 Шур Я. С., Глазер А. А., Тагиров Р. И. и др.— ДАН СССР, 1973, т. 210, с. 822.  
 Шур Я. С., Храбров В. И.— ЖЭТФ, 1969, т. 57, с. 1899.  
 Храбров В. И.— ФТТ, 1973, т. 15, с. 148.  
 Гасс В. Г., Шур Я. С., Глазер А. А.— ФММ, 1977, т. 43, с. 217; ФТТ, 1974, т. 16, с. 1704.  
 Глазер А. А., Гасс В. Г., Потапов А. П., Шур Я. С.— ФММ, 1978, т. 45, с. 876.  
 Оноприенко Л. Г.— ФТТ, 1973, т. 15, с. 542.

538.22(048)

**Ю. А. Изюмов.** Симметрия магнитоупорядоченных кристаллов и рассеяние медленных нейтронов. Классификация магнитных структур кристаллов и способы расшифровки их из нейтронограмм могут быть даны на основе теории представлений пространственной группы  $G$  исходного парамагнитного кристалла. Магнитная структура представляется в виде разложения по базисным функциям неприводимых представлений с заданным волновым вектором. Симметричный анализ большого числа разнообразных магнитных структур (ортоферритов, шпинелей, гранатов, редкоземельных металлов и др.) показал, что в подавляющем большинстве случаев они описываются одним неприводимым представлением группы  $G$  в соответствии с теорией фазовых переходов Ландау. Таким образом, магнитная структура может быть полностью задана небольшим числом параметров — коэффициентами смешивания базисных функций релевантного неприводимого представления.

При обработке нейтронограммы вариации подлежат не компоненты магнитных моментов  $\sigma$  атомов примитивной ячейки кристалла, а коэффициенты смешивания, число которых равняется размерности  $l$  неприводимого представления. Сокращение числа варьируемых параметров с  $3\sigma$  до  $l$  и составляет одно из преимуществ симметричных методов в нейтронографии; оно тем эффективнее, чем сложнее исследуемый кристалл, т. е. чем больше  $\sigma$ . Выведены удобные рабочие формулы для вычисления базисных функций магнитного представления кристалла, необходимых для симметричного анализа магнитных структур.

Показано, что в общем случае магнитная структура характеризуется не одним волновым вектором, а набором лучей звезды, для которых соответствующий лучевой вклад отличен от нуля. Этот набор, называемый нами каналом перехода, определяет магнитную решетку кристалла. Для всех исходных решеток Бравэ перечислены решетки шубниковской симметрии, получающиеся во всех каналах лифшицевских звезд и в каждом случае указаны соответствующие магнитные рефлексы.

Исследованы поляризационные эффекты при рассеянии нейтронов на произвольной магнитной структуре: зависимость сечения рассеяния от ориентации вектора поляризации начального пучка и возникновение вектора спонтанной поляризации в рассеянном пучке. Показано, каким образом по измеренным поляризационным эффектам с привлечением симметричного анализа можно целиком расшифровать магнитную структуру по одному магнитному рефлексу, если структура характеризуется одним волновым вектором. В общем случае минимальное число необходимых магнитных рефлексов равно числу лучей звезды волнового вектора.

Проанализированы известные примеры магнитных структур, описываемых двумя или более неприводимыми представлениями. Показано, что в ряде случаев на это имеют место симметричные причины. Одна из таких причин — дополнительная (по отношению к симметрии исходного кристалла) симметрия обменного гамма-тонна — инвариантность к вращению всех спинов. Она приводит к дополнительному вырожде-

нию обменной энергии, проявляющемуся в существовании обменных мультиплетов. Приведены примеры магнитных структур, характеризующихся сразу несколькими неприводимыми представлениями группы  $G$ , которые входят в состав одного обменного мультиплета.

## ЛИТЕРАТУРА

- I z u m o v Yu. A., Naish V. E.— J. Magn. and Magn. Mater., 1979, v. 12, p. 239.  
I z u m o v Yu. A., Mat.— Ibid., 1980, v. 21, p. 33; УФН, 1980, т. 131, с. 387; ФТТ, 1981, т. 28, с. 796, 2266.  
И з ю м о в Ю. А., Н а и ш В. Е., О з е р о в Р. П. Нейтронография магнетиков.— М.: Атомиздат, 1981.

538.22(048)

**С. К. Сидоров.** Нейтронографическое исследование сплавов переходных металлов со смешанным обменным взаимодействием. Под смешанным обменным взаимодействием понимается наличие в сплаве набора межатомных обменных взаимодействий разного знака (ферро- и антиферромагнитных). Такие конкурирующие взаимодействия порождают многочисленные аномалии физических свойств в сплавах, что и определяет интерес к подобным веществам.

Наличие в сплаве ферро- и антиферромагнитных взаимодействий должно приводить к постепенной разориентации магнитных моментов и, наконец, к исчезновению спонтанной намагниченности при некоторой концентрации компоненты, вносящей антиферромагнитные взаимодействия. На основе этих соображений предложена феноменологическая теория намагниченности подобных сплавов, которая количественно подтверждена экспериментами.

Разориентация магнитных моментов в сплаве зависит от локального окружения узла кристаллической решетки. Поэтому сплав со смешанным обменным взаимодействием должен быть пространственно неоднородным по намагниченности. Экспериментально это подтверждено нейтронографически.

На поликристаллических и монокристаллических образцах сплава Ni — (60—70) ат.% Fe при геллевой температуре впервые нейтронографически обнаружены сверхструктурные магнитные рефлексы, свидетельствующие об установлении антиферромагнитного упорядочения при температуре Нееля 10—20 К в зависимости от состава сплава. Подробный анализ показал, что слагающие магнитных моментов железа и никеля, перпендикулярные направлению спонтанной намагниченности образуют антиферромагнитную структуру IV рода в г. ц. к. решетке. В целом магнитные моменты компонент сплава образуют сложную, неколлинеарную структуру, дающую на нейтронограмме одновременно ферро- и антиферромагнитные рефлексы.

В результате нейтронографического и рентгеновского исследований монокристаллов железо-никелевых сплавов с концентрацией 60—75 ат.% железа обнаружены слабые сверхструктурные сателлиты. Это означает, что задолго по температуре и концентрации до мартенситного превращения возникают структурные изменения, которые можно рассматривать как подготовительные для последующего мартенситного перехода. Первые сателлиты и  $\gamma'$ -фаза возникают при температуре около 900 К. При более низкой температуре одновременно с магнитным превращением возникает новая группа сателлитов, характеризующая  $\gamma''$ -фазу. Происхождение сателлитов, по-видимому, связано с «конденсацией» акустических фононов в г. ц. к. решетке. Такое статическое смещение атомов из идеальных положений в узлах решетки, очевидно, связано с увеличением объема сплава. Это обстоятельство, по-видимому, позволяет по-новому поставить вопрос о причине инварного эффекта. При нагреве от низких температур сплав должен расширяться. Но так как рефлексы  $\gamma'$ - и  $\gamma''$ -фаз убывают с температурой, то тепловое расширение будет компенсироваться уменьшением объема, связанным с уменьшением статических смещений атомов из положений равновесия, а это и есть инварный эффект.

Оказалось, что сателлиты  $\gamma''$ -фазы в обратной г. ц. к. решетке расположены закономерно так, что  $\gamma''$ -фаза обеспечивает симметричную связь между  $\gamma$ - и  $\alpha$ -фазами, так как совокупность узлов обратной решетки  $\alpha$ -фазы определяется комбинацией рефлексов исходной  $\gamma$ -фазы и волновых векторов сателлитов  $\gamma''$ -фазы. При этом автоматически получаются известные соотношения Нипиямы для взаимной ориентации  $\gamma$ - и  $\alpha$ -фаз при мартенситном превращении.

## ЛИТЕРАТУРА

- С и д о р о в С. К.— ФММ, 1978, т. 45, с. 532.  
М е н ь ш и к о в А. З., С и д о р о в С. К., А р х и п о в В. Е.— ЖЭТФ, 1971, т. 61, с. 311.  
D u b i n i n S. F., T e p l o u c h o v S. G., S i d o r o v S. K., I z u m o v Yu. A., S y r o m y a t n i k o v V. N.— Phys. Stat. Sol. Ser. a, 1980, v. 61, p. 159.

Dubin S. F., Teplouchov S. G., Sidorov S. K.— Ibid., 1979, v. 54, p. 239.  
 Дубинин С. Ф., Теплоухов С. Г., Изюмов Ю. А., Сыромятников В. Н., Сидоров С. К.— ФММ, 1980, т. 50, с. 1276.

53.548(048)

**Б. Н. Гошицкий.** Неравновесное состояние дефектных упорядоченных кристаллов. Физические свойства упорядоченных кристаллов чрезвычайно сильно зависят от степени упорядоченности расположения атомов разного сорта по соответствующим узлам кристаллической решетки. В последнее время для создания разупорядоченных состояний все более широко применяются ядерные излучения. Таким методом в кристаллах удается реализовать «физически чистое» разупорядоченное состояние, которое во многих случаях невозможно получить традиционными технологическими приемами. В этом состоянии кристаллы сохраняют стехиометрический состав и однородны по объему, а атомы разного сорта статистически распределены по узлам совершенной кристаллической решетки.

Свойства кристаллов в этом термодинамически неравновесном структурном состоянии явно необычны. По существу, таким путем получают стабильные материалы с новыми, ранее неизвестными свойствами. Так, например, температура Кюри некоторых ферритов увеличивается на сотни градусов, электросопротивление может измениться на несколько порядков. Мягкий никелевый феррит в таком состоянии становится магнитомягким материалом с коэрцитивной силой порядка тысячи эрстед; цинковый феррит становится ферромагнетиком с  $T_c = 620$  К. В хромите магния, имеющем в исходном состоянии структуру шпинели, реализуется структура типа  $V_1$ : ионы хрома остаются в «законных» октаэдрических узлах, а ионы магния статистически перераспределяются по тетраэдрическим и «запрещенным» в структуре шпинели октаэдрическим узлам. В интерметаллидах со структурой А-15 в том состоянии температура перехода в сверхпроводящее состояние может уменьшаться или увеличиваться почти на порядок, либо слабо изменяться. При сохранении кристаллической структуры в них изменяет знак температурный коэффициент электросопротивления. В  $V_3Si$  исчезает упругая анизотропия, что редко наблюдается даже в чистых металлах.

Изучение кристаллов в этом необычном структурном состоянии открывает новое направление исследования фундаментальных свойств твердого тела. В частности, таким путем были определены величины обменного взаимодействия ионов  $Fe^{3+}$ , находящихся в тетра- и октаэдрических узлах шпинельной решетки, найдена энергия предпочтения ионов цинка и магния к октаэдрическим узлам в цинковом и магниевом ферритах. В никелевом феррите определена величина магнитного момента и вклад в магнитокристаллическую анизотропию иона  $Ni^{2+}$  в тетраэдрической позиции.

#### ЛИТЕРАТУРА

Чукалкин Ю. Г., Гошицкий Б. Н.— В кн.: Физические свойства магнитных материалов. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1982.— С. 135.  
 Гошицкий Б. Н.— ФММ, 1979, т. 48, с. 707.  
 Архипов В. Е., Ворони В. И., Карькин А. Е., Мирмельштейн А. В.— В кн.: Тезисы докладов на 24-м Всесоюзном совещании по физике низких температур.— Харьков, 1980.— Ч. 1, с. 264.

546 3(048)

**С. М. Клоцман.** Структура, свойства и взаимодействия точечных дефектов и их влияние на радиационно-стимулированные явления в металлах. 1. Основные изменения свойств реальных материалов, работающих под облучением, являются результатом: а) накопления первичных радиационных дефектов (РД) и их превращений во вторичные РД; б) выделения и растворения фаз, перераспределения фаз в пространстве, что явно вызвано диффузионными процессами, протекающими в экстремальных условиях. Из многообразия явлений, возникающих под облучением, выделим *радиационно-стимулированную сегрегацию (РСС) и перераспределение компонент сплавов под облучением и радиационное агломерирование.*

2. Собственное внедрение, структура которого определена по диффузному и фоновому рассеянию рентгеновских лучей<sup>1</sup>, представляет собой гантель с ориентацией [100] в г. ц. к.- и [110] в о. ц. к.-кристаллах. При образовании собственного внедрения в колебательном спектре кристалла появляются резонансные моды с частотами около  $0,1 \omega_{max}$ . Это обуславливает удивительно высокую подвижность собственных внедрений: даже при гелиевых температурах они мигрируют по кристаллу<sup>2</sup>. Часть из них при этом рекомбинирует с вакансиями, часть встречается с примесями, взаимо-

действие с которыми носит в основном упругий характер. При взаимодействии внедрения с примесью возможен переход примеси в междоузлие с образованием смешанной гантели, которая обладает такой же трансляционной подвижностью, как и собственное внедрение.

3. Внедрения, образованные облучением при достаточно высоких температурах, диффундируют по стоки (дислокации, границы зерен, поверхности). Образующиеся по пути смешанные гантели переносят примеси на стоки РД, где концентрация примесей может на порядки превысить среднюю концентрацию в объеме твердого раствора. Явление РСС было открыто нами на сильно разбавленных твердых растворах серы в никеле<sup>3-5</sup>. Остаточное сопротивление этих твердых растворов не возрастало при накоплении РД, а падало с ростом флюенса в оптимальном интервале температур. РСС реализуется в условиях, когда подвижны оба партнера френкелевских пар внедрения — вакансии. Как и внедрения, вакансии образуют комплексы с примесями. Ведущим взаимодействием при этом является кулоновское взаимодействие избыточных экранированных зарядов вакансии и примеси. Его проявлением является линейное уменьшение энергии активации диффузии с ростом избыточного заряда примесей, стоящих в одном ряду периодической системы с растворителем<sup>6-9</sup>. Наличие градиента концентрации вакансий вблизи стока РД порождает потоки компонент сплава. При этом быстро диффундирующий компонент отводится от стока в объем, что приводит к обогащению стока медленным компонентом.

4. Развитие РСС и перераспределение компонент на стоках РД создает высокие концентрации примесей и охрупчивающие фазы на границах раздела, что резко ослабляет их. Пластичность технического никеля, облученного электронами с энергией 6 МэВ (не образуется трансмутационный гелий!), падает в 2—2,5 раза по сравнению с необлученным<sup>10</sup>. Насыщение гелием до концентраций, существенно превышающих уровень его наработки в реакторах, не оказывает влияния на пластичность исходного и облученного никеля. Возможный путь подавления вредного воздействия РСС — очистка материалов от вредных примесей и повышение количества стоков РД, чтобы обеспечить низкий уровень их обогащения при заданной скорости генерации подвижных РД.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Schilling W.— J. Nucl. Mater., 1978, v. 69—70, p. 465.
2. Клоцман С. М.— ФММ, 1976, т. 41, с. 1317.
3. Аракелов А. Г., Арбузов В. Л., Владимиров А. Б., Вотиннов С. Н., Данилов С. Е., Доманский Д. Э., Клоцман С. М., Николаев А. Л., Павлов В. А., Розенблат А. М., Трахтенберг И. Ш.— Письма ЖЭТФ, 1979, т. 29, с. 744.
4. Арбузов В. Л., Вотиннов С. Н., Данилов С. Е., Доманский Д. Э., Клоцман С. М., Павлов В. А., Розенблат А. М., Талинский В. К., Трахтенберг И. Ш.— ДАН СССР, 1979, т. 244, с. 1114.
5. Арбузов В. Л., Данилов С. Е., Доманский Д. Э., Клоцман С. М., Николаев А. Л., Вотиннов С. Н. Вопросы атом. науки и техн., 1981, вып. 4(18), с. 2.
6. Кайгородов В. Н., Клоцман С. М., Тимофеев А. Н., Трахтенберг И. Ш.— ФММ, 1969, т. 28, с. 120.
7. Клоцман С. М., Рабовский Я. А., Талинский В. К., Тимофеев А. Н.— ФММ, 1978, т. 45.
8. Владимиров А. Б., Кайгородов В. Н., Клоцман С. М., Трахтенберг И. Ш.— ФММ, 1979, т. 48, с. 352.
9. Arshirova N. K., Veretennikov L. M., Klotzman S. M., Polikarova I. P., Tatarinova G. N., Timofeev A. N.— In: Yamada Conference on Point Defects and Defects Interactions in Metals— Kyoto, Japan, 1981.— p.36.
10. Арбузов В. Л., Вотиннов С. Н., Григорьян А. А., Данилов С. Е., Клоцман С. М.— ДАН СССР, 1982, т. 263, с. 1453.

669 140(048)

**В. Д. Садовский.** Структурная наследственность в стали. Известно, что мелкокристаллическая (мелкозернистая) структура в металлах и сплавах отличается лучшим сочетанием прочности и пластичности, по сравнению с крупнокристаллической. Среди других сплавов сталь отличается едва ли не уникальной особенностью — возможностью исправления крупнозернистой структуры с помощью только термической обработки — без применения пластической деформации. Известно, что эта очень важная для техники возможность (открытая Д. К. Черновым) связана с полиморфизмом железа, в частности с происходящим при нагреве стали выше критических



точек ( $A_{c_1} - A_{c_2}$ ) превращением альфа (о. ц. к.) — гамма (г. ц. к.). Именно в результате этого превращения образуется, как правило, мелкозернистая структура  $\gamma$ -фазы и после охлаждения получается требующаяся мелкозернистая структура стали.

В ряде случаев, однако, полиморфное превращение  $\alpha - \gamma$  не сопровождается перекристаллизацией — зерно стали остается крупным, равным исходному. В этом и проявляется структурная наследственность. Решающее влияние в этом отношении оказывает характер исходной структуры и скорость нагрева. При исходной кристаллографически упорядоченной структуре (мартенсита, бейнита) очень быстрый или, напротив, очень медленный нагрев стали выше критических точек не сопровождается рафинировкой структуры, несмотря на происходящее полиморфное превращение  $\alpha - \gamma$ . Последнее осуществляется кристаллографически упорядоченным механизмом, перекристаллизация — в смысле измельчения кристаллитов — отсутствует, исходное крупное зерно воспроизводится, наследуется по величине и ориентировке, теряется присущая стали возможность рафинировки структуры. Строго говоря, и в этом случае возможность перекристаллизации остается, но уже не непосредственно при фазовом превращении  $\alpha - \gamma$ , а при более высоких температурах — в однофазной  $\gamma$ -области и в результате другого процесса — самопроизвольной рекристаллизации  $\gamma$ -фазы, обусловленной внутренним (фазовым) наклепом. Перекристаллизация следует двухстадийной схеме: сперва происходит  $\alpha - \gamma$  превращение, не сопровождающееся изменением величины кристаллитов, затем следует рекристаллизация  $\gamma$ -фазы. Двухстадийность перекристаллизации чаще проявляется в легированных сталях, но вполне надежно обнаруживается и в простых углеродистых сталях, например, при сверхбыстром лазерном нагреве<sup>1</sup>.

Таким образом, полиморфное превращение  $\alpha - \gamma$ , в зависимости от его структурного механизма — кооперативного или рекристаллизационного («нормального» по Г. В. Курдюмову) — не сопровождается или, соответственно, сопровождается перекристаллизацией. Кооперативный механизм может, однако, приводить к такой насыщенности структурными несовершенствами, что при более высоких температурах становится возможной самопроизвольная рекристаллизация. В других полиморфных металлах (например, в кобальте, титане и его сплавах) эта вторая стадия может отсутствовать и рафинировка структуры становится невозможной, несмотря на наличие полиморфизма. Напротив, рафинировка кристаллической структуры оказывается иногда возможной без участия полиморфизма. Примером являются сплавы с ячеистым распадом при старении, в которых рост ячеек продуктов распада пересыщенного твердого раствора сопровождается переориентацией в микрообъемах.

#### ЛИТЕРАТУРА

Садовский В. Д., Табатчикова Т. И., Салохин А. В., Малыш М. М. — ФММ, 1982, т. 53, с. 88.

669,140(048)

**В. В. Сагарадзе.** Упрочнение аустенитных немагнитных сталей фазовым наклепом. Метод упрочнения аустенитных метастабильных сплавов в результате проведения прямого и обратного мартенситных превращений  $\gamma - \alpha - \gamma$ , называемый фазовым наклепом, был развит в Институте физики металлов АН СССР в конце 50-х годов в работах К. А. Малышева, В. Д. Садовского и их сотрудников<sup>1</sup>.

Упрочнение аустенита в результате двойного мартенситного превращения объясняется как частичным наследованием дислокационной структуры мартенсита образующимся аустенитом, так и введением новых структурных несовершенств непосредственно в процессе обратного мартенситного превращения. В работах, выполненных в последнее время<sup>2,3</sup>, показано, что в зависимости от условий проведения  $\alpha - \gamma$  превращения в аустенитных сплавах на железо-никелевой основе можно получить различные структурные типы  $\gamma$ -фазы (крупнопластинчатая, тонкопластинчатая, глобулярная) и соответственно совершенно различные механические свойства.

Формирование крупнопластинчатого аустенита имеет место при ускоренном нагреве, когда превращение  $\alpha - \gamma$  обладает всеми признаками мартенситного механизма. При этом в результате циклического превращения  $\gamma - \alpha - \gamma$  наблюдается преимущественное «восстановление» исходной ориентации аустенита. Уменьшение скорости нагрева при  $\alpha - \gamma$  превращении до определенной критической величины ( $\sim 0,4$  град/мин в сплавах железа с 32% никеля) приводит к образованию другой разновидности аустенита: чрезвычайно дисперсных различно ориентированных пластинчатых  $\gamma$ -кристаллов с плоскостью габитуса  $\{156\}_{\alpha}$ . При выделении этих кристаллов можно в 1,5 раза увеличить предел текучести безуглеродистого мартенсита. Образование третьей структурной формы  $\gamma$ -фазы — глобулярного аустенита (размеры глобулей

до 1 мкм) — происходит в железоникелевых сплавах на второй стадии  $\alpha - \gamma$ -превращения при медленном нагреве.

К настоящему времени разработаны упрочняемые фазовым наклепом и старением аустенитные неферромагнитные стали типа Н26ХТ1 и Н26ТЗ, которые имеют более высокие значения предела выносливости ( $\sigma_{-1} = 60 \text{ кг/мм}^2$ ) по сравнению с известными аустенитными сталями, а также могут успешно подвергаться поверхностной упрочняющей обработке с образованием износостойкого мартенситного слоя любой глубины. Проводятся работы по созданию упрочняемых фазовым наклепом нержавеющей сталей, а также аустенитных сплавов на железо-марганцевой основе. Обнаружены новой структурной разновидности аустенита: тонкопластинчатой  $\gamma$ -фазы с габитусом  $\{156\}_\alpha$ , образующейся при  $\alpha - \gamma$ -превращении в условиях размножения кристаллографических ориентаций аустенита, позволяет развивать исследования в направлении создания новых высокопрочных материалов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бородин Н. А., Горбач В. Г., Малышев К. А., Мирмельштейн В. А., Садовский В. Д. — В кн.: Упрочнение сталей. Свердловск, Metallurgizdat. Свердлов. отд-ние, 1960. — С. 5.
2. Сагарадзе В. В., Васева Ю. А. — ФММ, 1976, т. 42, с. 397.
3. Малышев К. А., Сагарадзе В. В., Сорокин И. П., Земцова Н. Д., Теплов В. А., Уваров А. И. Фазовый наклеп аустенитных сплавов на железо-никелевой основе. — М.: Наука, 1982.

669.018(048)

**В. И. Сюткина.** Новые механизмы упрочнения упорядоченных сплавов. Современной промышленности очень нужны сплавы с комплексом оптимальных свойств. Разработка таких сплавов особенно трудна. Большим резервом для улучшения физико-механических свойств сплавов являются фазовые превращения, среди которых атомное упорядочение занимает особое место и прежде всего потому, что при установлении дальнего порядка в расположении атомов разного сорта одновременно изменяются многие свойства сплава: электрические, тепловые, магнитные, механические, коррозионные и др. А это уже может служить основанием для разработки сплавов с комплексом свойств. Однако широкому промышленному использованию упорядоченных сплавов препятствуют их неудовлетворительные механические свойства: сплавы либо недостаточно прочны, либо очень хрупкие.

Исследованиями Института физики металлов на системе сплавов золото — медь показано, что можно получать высокопрочные упорядоченные сплавы с комплексом оптимальных свойств, стабильных в широком температурном интервале. Для упрочнения сплавов предложено использовать доменные границы<sup>1,2</sup>. Чтобы роль доменных границ в сплавах типа  $\text{Cu}_3\text{Au}$  оказалась решающей в повышении прочностных характеристик,<sup>3</sup> необходимо совместить в сплаве два фазовых превращения: атомное упорядочение и распад пересыщенного твердого раствора. При совместном их осуществлении доменные границы являются местами гетерогенного зарождения выделяющейся фазы. Варьируя количество и сорт легирующей добавки, а также размер объемной сетки доменных границ, можно изменять механические свойства упорядоченного сплава в очень широких пределах. Например, при легировании сплава серебром предел текучести удается повысить от 60 до 780 МПа. Такие сплавы уже относятся к разряду высокопрочных.

При специальном легировании сплава  $\text{Cu}_3\text{Au}$  в нем можно создавать периодическую антифазную доменную структуру с периодом от 2 до 20 параметров решетки. Плотность доменных границ в таких сплавах особенно велика. Периодические антифазные доменные границы также могут являться местами гетерогенного зарождения выделяющейся фазы<sup>3</sup>. Структуры такого типа могут оказаться интересными не только для разработки высокопрочных, но и специальных магнитных сплавов, имеющих антиферромагнитные выделения в ферромагнитной матрице или выделения ферромагнитной фазы в антиферромагнитном окружении. Возможно, что структуры, в которых будут строго закономерно, через несколько параметров решетки, чередоваться сверхпроводящие и не сверхпроводящие прослойки, окажутся интересными для разработки сверхпроводящих материалов.

Прочностные свойства эквиатомных сплавов типа  $\text{CuAu}$  удается повысить за счет доменнограницного упрочнения без дополнительного легирования сплава. Резко выраженное расположение атомов разного сорта в упорядоченных сплавах эквиатомного состава усложняет доменную структуру. Кроме антифазных доменных границ возникают границы доменов, у которых послыльное расположение атомов разного сорта взаимно перпендикулярно. Измельчая доменную структуру, можно получить высокопрочные упорядоченные сплавы с пределом текучести 730—830 МПа. Такие сплавы

сохраняют весь комплекс оптимальных свойств, присущих упорядоченному состоянию, и пригодны для решения многих задач современного приборостроения. При дополнительном легировании сплавов и совмещении упрочнения от атомного упорядочения и распада пересыщенного твердого раствора предел текучести удается повысить до 1300 МПа<sup>1</sup>. Сплавы такого типа являются наиболее перспективными для разработки высокопрочных упорядоченных сплавов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Сюткина В. И., Ясырева Л. П., Абдулов Р. З.— ФММ, 1982, т. 53, с. 385.
2. Сюткина В. И., Шашков О. Д., Рудецко В. К., Кислицына И. Е.— УФЖ, 1982.
3. Суханов В. Д., Шашков О. Д., Сюткина В. И.— ФММ, 1980, т. 49, с. 1267.

53:548(048)

**В. А. Трапезников.** Исследование поверхностных слоев твердых тел методом электронной спектроскопии. Рассмотрено влияние, порой определяющее, поверхности твердых тел и ее состояния на электронную структуру и механические свойства. Приведены результаты классических работ по уменьшению прочности кристаллов каменной соли из-за наличия трещин на внешней поверхности кристаллов (А. Ф. Иоффе), по исследованию межкристаллитной внутренней адсорбции примесей на внутренние поверхности раздела сталей (В. И. Архаров) и по определению собственных поверхностных состояний, обусловленных конечностью размеров исследуемых образцов (И. Е. Тамм). Сделан обзор работ (в основном оригинальных) по исследованию методами электронной спектроскопии внешних и внутренних поверхностей металлов и полупроводников<sup>1</sup>.

При исследовании внешних поверхностей аморфного и кристаллического кремния показано существенное различие распределения состояний в валентной полосе<sup>2</sup>, а в сплавах железа с углеродом, хромом и примесями в аморфном состоянии появляется электронная линия с энергией 32 эВ, тогда как в кристаллическом состоянии ее нет<sup>3</sup>. Приведены результаты исследований состава и глубины окисления поверхностных слоев порошков вольфрама<sup>4</sup>. Приведены примеры анализа сверхтонких поверхностных слоев никеля, циркония, ниобия, палладия, стали и элементов эмиссионной электроники при сопоставлении с другими методами неразрушающего контроля внешних поверхностей<sup>5</sup>.

Исследования внутренних поверхностей раздела (границ зерен, межфазных границ, промежуточного слоя между покрытием и основой) представлены рядом работ по изучению методами рентгеноэлектронной и оже-спектроскопии поверхностей изломов, получающихся при отпусковой хрупкости и камневидном изломе стали<sup>6</sup>. Приведены данные по составу, структуре и свойствам переходного слоя между хромовым покрытием и сталью и природе адгезии меди на оксиде алюминия<sup>7</sup> по старению алюминевых сплавов.

Изложены результаты разработок электронных спектрометров<sup>8</sup>, методик и приставок для воздействий на образец в вакууме спектрометра: для механической<sup>9</sup> и ионной<sup>10</sup> очистки, для излома и охлаждения образцов до азотных температур. Последнее открывает возможность исследования биологических объектов. Первые исследования высушенной и замороженной крови показывают значительные изменения в интенсивности и положении электронных линий углерода, азота и кислорода для старых и молодых, больных и здоровых людей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Трапезников В. А.— Поверхность, 1982, № 4, с. 18.
2. Шабанова J. N., Трапезников V. D. J. Electron Spectrosc., 1975, v. 6, p. 297.
3. Шабанова И. Н., Самойлович С. С., Журавлев В. А.— Поверхность, 1982, № 2, с. 129.
4. Кулябина О. А., Шабанова И. Н., Трапезников В. А., Митрохин Ю. С., Ломаева С. Ф., Гайворонский А. Т.— Порошковая металлургия, 1982, № 5.
5. Трапезников В. А., Куртов В. С., Максютов Ф. Б.— Дефектоскопия, 1981, № 4, с. 85; Рац Ю. В., Финогенов В. М., Трапезников В. А.— Дефектоскопия, 1981, № 10, с. 110.
6. Шабанова И. Н., Кутьин А. Б., Смирнов Л. В., Трапезников В. А.— ФММ, 1976, т. 42, с. 318;

- Устиновщиков Ю. И., Шабанова И. Н., Сапухин В. А., Трапезников В. А.—ФММ, 1977, т. 44, с. 336;  
 Зинченко С. А., Шабанова И. Н., Кутьин А. Б., Запороженко В. И.—ФММ, 1981, т. 52, с. 197.
7. Морозов Э. Н., Худяков В. Л., Ляхович А. М., Шабанова И. Н., Трапезников В. А.—Изв. АН СССР. Сер. «Неорг. материалы», 1981, т. 17, с. 177.
  8. Трапезников В. А., Евстафьев А. В., Сапожников В. П., Шабанова И. Н., Ключников О. И., Максютов Ф. Б., Кузнецов В. Л., Соколов О. Б.—ФММ, 1973, т. 36, с. 1293.
  9. Шабанова И. Н., Брагин В. Г., Евстафьев А. В., Трапезников В. А.—Металлофизика, 1981, т. 3, с. 102.
  10. Брагин В. Г., Шабанова И. Н., Кулябина О. А., Холин Н. А., Трапезников В. А.—Поверхность, 1982, № 11.

538 249(048)

**В. Е. Щербинин.** Магнитные, магнитоупругие и магнитоакустические методы неразрушающего контроля. В наше время неразрушающий контроль качества превращается из средства сортировки в средство активного воздействия на производственный процесс. В широком смысле слова под неразрушающими методами контроля следует понимать оценку функциональной пригодности изделий, которая определяется как совокупность химических, физических и структурных свойств, обеспечивающих работу изделий в заданных условиях, причем эта оценка должна применяться на всех стадиях производства и влиять на него.

При неразрушающих испытаниях на объект контроля воздействуют каким-либо физическим полем и по его реакции судят о состоянии этого объекта. Методы контроля, при которых используется постоянное магнитное поле, называют магнитными. С их помощью могут быть решены три класса технических задач: определение механических свойств ферромагнитных изделий, измерение геометрических параметров, обнаружение нарушений сплошности.

Испытание механических свойств основано на корреляции между требуемыми от изделия механическими свойствами и магнитными характеристиками. Часто достаточно использовать только одну магнитную характеристику, например коэрцитивную силу, чтобы установить качество изделия. Так, для контроля термообработки сталей широко используются коэрцитиметры М. Н. Михеева<sup>1</sup>. В других случаях, например, для контроля некоторых легированных сталей, используют две характеристики или учитывают всю петлю гистерезиса.

Для этих же целей нами предложен магнитоупругий метод, заключающийся в том, что изделие намагничивают, затем нагружают в упругой области и по изменению  $\Delta V$  судят о механических свойствах, например твердости. Таким путем удается наладить контроль изделий из таких сталей, как 40Х и других высокоуглеродистых легированных сталей после среднего и высокотемпературного отпуска. Дефектоскопы-автоматы, реализующие этот принцип, успешно работают в промышленности<sup>2</sup>.

Используя переменную нагрузку, можно возбудить в изделии упругие колебания в области акустического резонанса. Э. д. с. от магнитоупругого эффекта в области намагничивающих полей, где в основном идут процессы вращения векторов спонтанной намагниченности, для всех без исключения сталей имеет однозначную зависимость от твердости.

Интересные возможности открываются при использовании электромагнитноакустического (ЭМА) преобразования. Коэффициент ЭМА преобразования не является достаточным, чтобы использовать ЭМА для возбуждения упругих колебаний в изделиях вместо известных контактных преобразователей (например, пьезоэлементов). Однако для многих изделий можно использовать резонансный режим. В частности, нами осуществлен контроль изделий в форме дисков, которые помещаются в поляризирующее поле, и отклонения от резонансной частоты фиксируются автоматически. Удаётся получить производительность контроля более 1000 штук в минуту и, что не менее важно, отбраковать любые дефекты, где бы они не находились (на поверхности или в толще металла). Другое перспективное направление ЭМА преобразования — прогнозирование напряженного состояния в ферромагнетиках, поскольку ЭМА сигнал при определенных условиях существенно зависит от магнитострикции<sup>3</sup>.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Михеев М. Н., Бида Г. В.—В кн.: Электромагнитные методы измерений и неразрушающего контроля. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1982.— С. 27.
2. Правдин Л. С., Деордиев Г. И., Зельский А. С.—Ibid.— С. 88—94.
3. Комаров В. А., Ильясов Р. С., Шакшин Н. И. и др.—Ibid.,— С. 103—107.