

БА180298сп.

АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛОРУССКОЙ ССР

Институт прикладной физики

На правах рукописи

НОВИКОВ Святослав Алексеевич

ИССЛЕДОВАНИЕ И КОНТРОЛЬ НЕОДНОРОДНОСТИ СТРУКТУРЫ  
МАТЕРИАЛА ПОЛУСНЫХ НАКОНЕЧНИКОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ  
РАДИОСПЕКТРОМЕТРОВ ЯМР ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ НА  
90 И 100 МГц

Специальность: 05.02.11 - Методы контроля материалов,  
деталей, узлов, изделий и сварных  
соединений

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени кандидата  
технических наук

Минск - 1982

Работа выполнена в Институте прикладной физики АН БССР.

НАУЧНЫЕ РУКОВОДИТЕЛИ: академик АН БССР, доктор физико-математических наук, профессор

**Н.С. АНУЛОВ**

кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник  
**А.А. ЛУКВИЧ**

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ: доктор технических наук  
**С.А. АСТАПЧИК**

кандидат технических наук  
**Н.О. ГУСАН**

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ: Научно-исследовательский институт  
интроскопии (г. Москва)

Защита диссертации состоится "27" мая 1982 года  
в 14 часов на заседании специализированного совета К 006.13.01  
по присуждению ученой степени кандидата наук при Институте  
прикладной физики АН БССР: (220600, г. Минск, ГСП, ул. Академи-  
ческая, 16).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института  
прикладной физики АН БССР.

Автореферат разослан "26" апреля 1982 г.

Ученый секретарь  
специализированного совета  
кандидат технических наук

Рудницкий В.А.

Ба 1802988р.

3

### ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Разрешающая способность и чувствительность радиоспектрометров ЯМР, широко используемых для научных исследований в химии, физике, биологии, медицине, определяется величиной и однородностью поля в зазоре магнита. Актуальность темы исследования связана с острой потребностью страны в радиоспектрометрах ЯМР высокого разрешения на 90 и 100 МГц, закупаемых в настоящее время за рубежом. Несмотря на определенные успехи в создании отечественных радиоспектрометров ЯМР с рабочими частотами до 60 МГц, выпуск приборов высокого разрешения на 90 и 100 МГц не был налажен.

Для получения спектров ЯМР высокого разрешения требуется весьма высокая однородность поля в объеме образца ЯМР-преобразователя, расположенного в зазоре: относительная неоднородность поля должна быть не более  $(2-3)10^{-9}$ . До последнего времени не были выполнены систематические исследования по взаимосвязи между структурой, магнитными свойствами материалов полюсных наконечников, распределением поля в зазоре и разрешающей способностью радиоспектрометра ЯМР. Вследствие этого отсутствовали данные по степени влияния неоднородной структуры и уровня магнитных свойств материала полюсных наконечников на распределение поля, не были сформулированы требования к их структуре и, следовательно, к технологии термической и механической обработки, не исследована и не реализована возможность контроля структурных неоднородностей.

Настоящая диссертационная работа является частью работ по созданию высокооднородных магнитных полей в радиоспектрометрах ЯМР, проводимых в ИФФ АН БССР по заданию Президиума АН СССР № 82-119 от 26.01.72 г. и Постановлению ГК Совета Министров СССР по науке и технике № 200 от 23.05.72 г.

Цель работы является изучение влияния неоднородности структуры материалов полюсных наконечников на распределение поля, разработка эффективной методики контроля неоднородностей структуры и исследование на ее основе условий термической и механической обработки полюсных наконечников, обеспечивающих необходимую структурную однородность, внедрение результатов при разработке отечественных радиоспектрометров ЯМР высокого разрешения на 90 и 100 МГц и серийном производстве радиоспектрометров ЯМР высокого разрешения на 90 МГц.

Дзяржаўная  
бібліятэка  
БССР  
Імя У. І. Леніна

17 0. 1. 2010

Научная новизна. В диссертации впервые установлена степень влияния структуры материала полюсных наконечников, формирующейся в процессе пластической деформации и термической обработки, на относительную неоднородность поля в объеме образца ЯМР-преобразователя.

Обоснована и разработана методика контроля неоднородности структуры полюсных наконечников по распределению остаточной индукции вблизи лицевых поверхностей. Установлена взаимосвязь между распределением остаточной индукции, параметрами структуры полюсных наконечников, формирующейся в процессе термической и механической обработки, распределением поля в зазоре и разрешающей способностью радиоспектрометра ЯМР. Показано, что остаточная индукция учитывает совокупное влияние различных структурных неоднородностей в достаточной степени, чтобы по ее распределению судить об их влиянии на распределение поля в зазоре.

Впервые исследовано влияние величины индукции в зазоре на неоднородность поля, обусловленную неоднородностью структуры материала наконечников. Сформулированы требования к магнитным характеристикам материалов и с их учетом предложены материалы для полюсных наконечников радиоспектрометров ЯМР высокого разрешения на 90 и 100 МГц. На основе предложенной методики контроля неоднородности структуры исследованы и разработаны условия термической и механической обработки полюсных наконечников, обеспечивающие высокую структурную однородность, достаточную для получения высокооднородного магнитного поля в объеме образца ЯМР-преобразователя.

Новизна разработок защищена двумя авторскими свидетельствами на изобретение.

Практическая ценность. Разработана методика контроля неоднородности структуры полюсных наконечников, позволяющая осуществлять ее эффективный контроль на стадии разработки технологии и в процессе изготовления полюсных наконечников.

Предложены материалы для полюсных наконечников радиоспектрометров ЯМР высокого разрешения на 90 и 100 МГц. Разработана технология термической обработки полюсных наконечников из электротехнической стали Э12Ш для радиоспектрометров ЯМР высокого разрешения на 90 МГц. Предложен новый способ термической обработки полюсных наконечников из железокобальтовых сплавов и на его основе разработана технология термической и механической обработки полюсных наконечников из сплава 49КФА-Э1 для радиоспектрометров ЯМР

высокого разрешения на 100 МГц.

Результаты исследований использованы при разработке первого в стране радиоспектрометра ЯМР высокого разрешения на 90 МГц, опытного образца радиоспектрометра ЯМР высокого разрешения на 100 МГц и внедрены при серийном производстве первой партии отечественных радиоспектрометров ЯМР высокого разрешения РЯ2309 на 90 МГц в производственном объединении "Аналитприбор" (г. Смоленск).

Суммарный экономический эффект от внедрения результатов работы составляет к настоящему времени около 500 тыс. рублей.

Результаты исследований могут быть использованы также при разработке прецизионных магнитов радиоспектрометров ЭПР, электронных микроскопов и других приборов, в которых необходимы магнитные поля высокой однородности.

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались и обсуждались на:

1. Симпозиуме "Достижения и проблемы радиоспектроскопии", Ленинград, 26-29 июня 1973 г.

2. Первой Белорусской республиканской научно-технической конференции "Неразрушающие методы и средства контроля и их применение в промышленности", Минск, 12-14 сентября 1973 г.

3. Республиканской конференции "Многопараметровый неразрушающий контроль ферромагнитных материалов и изделий", Минск, 24-25 сентября 1975 г.

4. Пятом Всесоюзном совещании по упорядочению атомов и влиянию упорядочения на свойства сплавов, Томск, 14-16 сентября 1976 г.

5. Второй Белорусской республиканской научно-технической конференции "Новые физические методы и средства контроля промышленных изделий", Минск, 27-28 сентября 1978 г.

публикации. Результаты исследований изложены в 19 научных работах, в том числе, 14 статьях и тезисах докладов конференций, 2 авторских свидетельства на изобретение, 3 отчетах о НИР.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложений. Общий объем диссертации - 217 с., основное содержание включает 138 с. машинописного текста, 56 рис., 5 табл., список литературы из 95 наименований.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отражена актуальность темы исследования, кратко изложено состояние вопроса, определены цель и задачи исследований,

сформулированы основные результаты и положения, которые выносятся на защиту.

В первом разделе проанализированы литературные данные по применяемым материалам для полюсных наконечников прецизионных магнитов, методам контроля неоднородности их структуры, способам управления структурой и свойствами.

Анализ показывает, что для получения высокой однородности магнитного поля необходимо обеспечить высокую структурную однородность материала полюсных наконечников. Однако имеющиеся немногочисленные и часто противоречивые литературные данные не позволяют выделить и объективно оценить степень влияния неоднородной структуры, вида материала полюсных наконечников на распределение поля и достигаемую разрешающую способность радиоспектрометров ЯМР на 90 и 100 МГц. Эти данные не позволяют выявить какие-нибудь определенные рекомендации по технологии термической и механической обработки полюсных наконечников, обеспечивающей оптимальный уровень их структурных характеристик для получения высокооднородного поля. Это не является случайным, а обусловлено сложностью задачи и многообразием влияющих факторов.

Создание полюсных наконечников с высокой структурной однородностью невозможно без контроля неоднородностей их структуры. В литературе не разработана методика контроля с необходимой точностью неоднородностей структуры полюсных наконечников.

Показано, что в качестве физического параметра контроля целесообразно использовать остаточную индукцию, измеряемую вблизи лицевых поверхностей полюсных наконечников. В литературе отсутствуют данные по взаимосвязи между неоднородностями структуры полюсных наконечников из различных материалов, неоднородностью распределения остаточной индукции вблизи лицевых поверхностей, распределением индукции в зазоре и разрешающей способностью радиоспектрометра ЯМР.

Рассмотрены способы управления структурой и свойствами материалов полюсных наконечников. Показано, что термическая и механическая обработки как финишные операции играют важную роль в формировании структуры и свойств полюсных наконечников, а следовательно, и в создании высокооднородного поля.

На основе проведенного анализа в настоящей работе поставлены следующие задачи:

1) установить степень влияния неоднородной структуры материала полюсных наконечников, формирующейся в процессе термической и

механической обработки, на уровень достигаемой разрешающей способности радиоспектрометра ЯМР:

2) разработать методику контроля неоднородности структуры полюсных наконечников по распределению остаточной индукции вблизи лицевых поверхностей;

3) установить взаимосвязь между распределением остаточной индукции и параметрами структуры полюсных наконечников из различных материалов, формирующейся в процессе термической и механической обработки;

4) исследовать взаимосвязь между распределением остаточной индукции вблизи лицевых поверхностей полюсных наконечников, распределением индукции в зазоре и разрешающей способностью радиоспектрометра ЯМР;

5) изучить влияние величины индукции в зазоре на неоднородность поля, обусловленную неоднородностью структуры полюсных наконечников; сформулировать требования к магнитным свойствам материалов и выбрать материалы для полюсных наконечников радиоспектрометров ЯМР высокого разрешения на 90 и 100 МГц;

6) с учетом полученных закономерностей исследовать и разработать условия термической и механической обработки полюсных наконечников, обеспечивающие высокую структурную однородность, достаточную для получения высокооднородного магнитного поля в объеме образца ЯМ-преобразователя при практической реализации отечественных радиоспектрометров ЯМР высокого разрешения на 90 и 100 МГц.

Во втором разделе рассмотрены методики экспериментальных исследований, материалы и оборудование, обоснована и разработана методика контроля неоднородности структуры полюсных наконечников по распределению остаточной индукции вблизи лицевых поверхностей.

В качестве материалов для полюсных наконечников исследовались поковки из прецизионных железокобальтовых сплавов 49КФА-ЭЛ, 50КФ-ЭЛ, полученные на заводе "Электросталь" им. И. Ф. Тевосяна, поковки из электротехнической стали Э12Н, полученные на заводе "Серп и Молот". Исследовался сплав 27Х-Вн, а также разработанный совместно в ИЭС ЦНИИЧМ им. И. П. Вардина и ИФФ АН БССР при участии автора сплав FeCo-2Мп. Полюсные наконечники изготавливались как непосредственно из цилиндрических поковок, так и из штампованных заготовок. Термообработка образцов и полюсных наконечников осуществлялась в вакуумной камере  $6 \cdot 10^{-2}$  Па в электроспечях СВЧ-

0,6 2/16 и СВНД-1,3 I/22 со специальной камерой. В процессе термообработки комплект из двух полюсных наконечников размещался в контейнере, что обеспечивало равномерное распределение температуры.

Полюсные наконечники изготавливались специальной конфигурации, близкой к "В-const". Это обеспечивало необходимую начальную однородность поля в зазоре и слабую зависимость макrorаспределения поля от величины индукции. Для исследований изготавливались также образцы-модели полюсных наконечников в форме дисков.

Исследовались важнейшие характеристики структуры материала полюсных наконечников, такие, как размер зерна, удельная поверхность границ зерен, микродеформация и период решетки, микротвердость. Осуществлялось построение гистограмм распределения размеров зерен и гистограмм микротвердости, на основании которых рассчитывались показатели разноразмерности и показатели рассеивания микротвердости. Наряду с этим, измерялись магнитные характеристики материалов ( $B$ ,  $B_r$ ,  $H_c$ ) баллистическим методом на кольцевых образцах.

Показано, что для контроля неоднородности структуры полюсных наконечников необходим физический диаметр, который учитывал бы совокупное влияние различных структурных составляющих на распределение поля. В качестве такого физического параметра использовалась остаточная индукция, измеряемая вблизи лицевых поверхностей полюсных наконечников. Обоснована и разработана методика контроля неоднородности структуры по амплитуде неоднородного распределения нормально<sup>6</sup> составляющей остаточной индукции вблизи лицевых поверхностей. Методика контроля включает намагничивание полюсных наконечников в электромагните радиоспектрометра ЯМР до индукций, близких к насыщению материала, и запись на самописце распределения нормальной составляющей остаточной индукции, измеряемой с помощью преобразователя, сканирующего лицевые поверхности, после извлечения наконечников из электромагнита. В качестве преобразователя магнитной индукции использовался микроферрозонд-полюмер (диаметр сердечника полузонда  $5 \cdot 10^{-5}$  м, длина  $10^{-3}$  м), разработанный и изготовленный в ИФ АН БССР.

Кратко рассмотрено влияние на характер распределения остаточной индукции длины зазора при намагничивании наконечников, шероховатости лицевых поверхностей, уровня магнитных свойств материала.

Исследования распределения индукции в зазоре электромагнита



радиоспектрометра ЯМР осуществлялись дифференциально включенными микропреобразователями Холла из  $InAs$  размерами  $0,5 \times 0,5 \times 0,1$  мм, изготовленными в ИИТТ и ИП АН БССР. Прецизионные измерения распределения индукции в рабочей зоне осуществлялись методом двух датчиков ЯМР, а также по ширине сигнала ЯМР.

В третьем разделе рассмотрено влияние условий термической и механической обработки полюсных наконечников из различных материалов на их структуру во взаимосвязи с распределением остаточной индукции вблизи лицевых поверхностей.

Исследования осуществлялись на образцах-моделях полюсных наконечников из различных материалов (сплавы 49КФА-ЭЛ, 50КФ-ЭЛ, Fe-Cc-2Мп, 27КХ-ВН, сталь ЭИ2Ш). Температура отжига изменялась в диапазоне  $600-1300^\circ\text{C}$ , длительность выдержки - в диапазоне 1-10 ч. Осуществлялись отжижки в одну, две и три стадии. Выбранные варианты термической обработки проверялись затем на реальных полюсных наконечниках.

Установлена взаимосвязь между распределением остаточной индукции вблизи поверхностей образцов-моделей полюсных наконечников из различных материалов и параметрами их структуры. Показано, что амплитуда неоднородного распределения остаточной индукции возрастает с увеличением среднего размера зерна (рис. 1), с увеличением показателей разности зернистости, уровни микронапряжений, неоднородности распределения микротвердости, степени кристаллографической разориентации зерен, при неоднородности фазового состава.

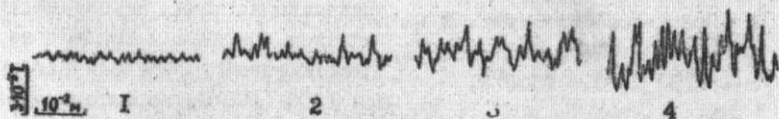


Рис. 1. Распределение остаточной индукции вблизи поверхностей образцов-моделей полюсных наконечников из сплава 49КФА-ЭЛ при различном среднем размере зерна: 1 - 15-20 мкм, 2 - 40-50 мкм, 3 - 100-120 мкм, 4 - 350-400 мкм.

Показано, что по изменениям отдельных структурных параметров либо магнитных характеристик невозможно определить условия термической обработки, обеспечивающие получение высокоструктурной структуры. Показано, что как магнитный параметр остаточная индукция учитывает совокупное влияние различных структурных составляющих,

что позволяет по амплитуде ее неоднородного распределения контролировать степень структурной неоднородности материала полюсных наконечников в ходе разработки технологии и в процессе изготовления.

Установлено, что амплитуда неоднородного распределения остаточной индукции существенно зависит от условий термообработки полюсных наконечников (рис. 2). Характер изменения амплитуды неоднородности в зависимости от условий термообработки связан с температурными границами фазовых переходов и для наконечников из железообальтовых сплавов 49КБА-3Л, 50КБ-3Л, Fe-Co-2Мл, 27КХ-ВН качественно аналогичен. Наиболее низкий уровень амплитуды неоднородности остаточной индукции соответствует мелкозернистой структуре с низкими показателями разнородности и наиболее низким уровнем микронапряжений.

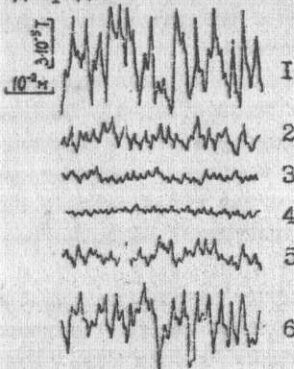


Рис. 2. Зависимость распределения остаточной индукции вблизи поверхностей образцов-моделей полюсных наконечников из сплава 49КБА-3Л от температуры отжига: 1 - исходное состояние, 2 - 650°C, 3 - 820°C, 4 - 950°C, 5 - 1100°C, 6 - 1300°C.

Минимальной амплитудой неоднородного распределения остаточной индукции, достигается в результате двухступенчатого отжига: предварительного — при температурах ( $\alpha + \gamma$ )-области вблизи ее верхней границы (950°C, 2-5 ч) либо в  $\gamma$ -области вблизи ее нижней границы (970-1000°C, 2-5 ч) и заключительного — при температурах  $\alpha$ -области вблизи ее верхней границы (800-850°C, 3-5 ч). Некоторое дополнительное повышение структурной однородности и уровня магнитных свойств обеспечивается при ступенчатом заключительном отжиге: 800-850°C (3-5 ч) + 700-750°C (5-10 ч). На основании указанных результатов разработан новый способ термической обра-

На основе установленной взаимосвязи между параметрами структуры материала, формирующейся в процессе термической обработки, и амплитудой неоднородного распределения остаточной индукции показано, что наиболее высокая структурная однородность полюсных наконечников из сплавов 49КБА-3Л и 50КБ-3Л после пластической деформации заготовок при 1000-1100°C, характеризуемая

наиболее высокая структурная однородность полюсных наконечников из сплавов 49КБА-3Л и 50КБ-3Л после пластической деформации заготовок при 1000-1100°C, характеризуемая

ботки полюсных наконечников из железокобальтовых сплавов (а.с. № 688533).

Установлено, что использование при выплавке железокобальтовых сплавов дог лнительных раскислителей либо легирующих присадок, измельчающих кристаллическую структуру, не гарантирует достижение более высокой структурной однородности, характеризуемой минимальной амплитудой неоднородного распределения остаточной индукции, при любых условиях термической обработки сплава. Уровень предельно достигаемой структурной однородности сплава слабо зависит от характера легирования (в диапазоне исследованных вариантов) и определяется, главным образом, условиями термической обработки. Путем выбора оптимальных условий термической обработки можно обеспечить высокую структурную однородность сплавов и без дополнительного легирования.

Показано, что зависимость амплитуды неоднородного распределения остаточной индукции от условий термообработки для полюсных наконечников из электротехнической стали Э12Ш является менее выраженной, чем для наконечников из железокобальтовых сплавов. Магнитные характеристики этой стали обладают меньшей структурной чувствительностью, а зависимость исследованных параметров структуры от условий термообработки более слабая, чем у железокобальтовых сплавов состава по железу и кобальту, близкого к эквивалентному. Сделан вывод, что в отношении структурных характеристик эта сталь является предпочтительной для изготовления полюсных наконечников. Показано, что пластическая деформация заготовок полюсных наконечников из электротехнической стали Э12Ш при температурах 800-1000°C, предварительный отжиг (после грубой механической обработки) при температурах 900-950°C (5 ч) и окончательный отжиг (после шлифования лицевых поверхностей) при температурах 820-850°C (5 ч) обеспечивают получение структуры с наиболее высокой однородностью.

Показано, что величина внутренних напряжений и характер их распределения более существенно влияют на уровень и распределение магнитных свойств полюсных наконечников из железокобальтовых сплавов, чем наконечников из стали Э12Ш. Это предъявляет определенные требования и к механической обработке лицевых поверхностей наконечников (токарной обработке, шлифованию, полировке). Показано, что степень неоднородности структуры металла поверхностного слоя может быть определена по амплитуде неоднородного

распределения остаточной индукции вблизи лицевых поверхностей. Установлено, что степень структурной неоднородности зависит от вида и режимов механической обработки и уменьшается при уменьшении толщины удленного металла за проход. Наиболее неоднородная структура формируется при токарной обработке. Приведены рекомендации по условиям шлифования и полировки лицевых поверхностей. Показано, что для снижения до минимального уровня неоднородностей структуры в металле поверхностного слоя полюсных наконечников из сплавов 49КФА-ЭЛ и 50КЭ-ЭЛ, вызванных грубой механической обработкой (токарная обработка, наклеп в результате ударов и т. п.), необходимо осуществлять отжиг при 950-1000°C.

В четвертом разделе приведены результаты исследований взаимосвязи между распределением остаточной индукции вблизи лицевых поверхностей полюсных наконечников, распределением поля в зазоре и разрешающей способностью радиоспектрометра ЯМР, обоснованы и предложены материалы для полюсных наконечников радиоспектрометров ЯМР на 90 и 100 МГц и условия их термической и механической обработки, обеспечивающие получение высокой разрешающей способности приборов.

Исследована степень влияния неоднородной структуры материала полюсных наконечников на распределение поля. Показано, что неоднородная структура исследуемых материалов полюсных наконечников, формирующаяся в процессе их изготовления, изменяет относительную неоднородность поля в объеме образца ЯМР-преобразователя на величину  $10^{-8}$ - $10^{-9}$ .

Неоднородность структуры полюсных наконечников образуется в основном как результат неоднородной пластической деформации, а также при определенных условиях термической обработки. Закономерности влияния возможных структурных неоднородностей материала на распределение поля в зазоре изучались на наконечниках с искусственно созданной локальной пластической деформацией лицевых поверхностей, причем нарушения геометрии предварительно устранялись шлифованием. Посредством отжига при различных температурах в зоне деформации формировались структуры, отличающиеся размером зерна, уровнем напряжений и т.д., что позволяло создать всевозможный набор структурных неоднородностей полюсных наконечников, которые могли иметь место на практике при их изготовлении.

Показано, что неоднородность поля сложным образом зависит от величины индукции и температуры отжига полюсных наконечников. По-

вышение температуры отжига наконечников из железокобальтовых сплавов выше температурной границы  $\alpha/\delta$  -превращения приводит к значительному уменьшению неоднородности поля в связи с выравниванием структуры неоднородных областей наконечников. При индукциях в зазоре, близких к индукции насыщения материала наконечников, степень влияния неоднородности структуры на распределение поля также значительно уменьшается, что обусловлено выравниванием магнитных проницаемостей неоднородных областей материала в связи с магнитным насыщением. Проверка по достигаемой разрешающей способности радиоспектрометра ЯМР многократно подтвердила полученные общие закономерности. Сделан вывод, что для полусных наконечников целесообразно использовать материалы, индукция насыщения которых близка к рабочей индукции в зазоре, что существенно ослабляет влияние структурных неоднородностей на распределение поля и упрощает процесс получения высокооднородного поля. На основе этого в качестве материала для полусных наконечников радиоспектрометра ЯМР на 90 МГц предложена электротехническая сталь ЭИ2Ш. Для полусных наконечников радиоспектрометра ЯМР на 100 МГц предложен сплав 49КФА-ЭЛ.

Показано существование взаимосвязи между амплитудой неоднородного распределения остаточной индукции вблизи лицевых поверхностей полусных наконечников, их структурой, формирующейся в процессе механической и термической обработки, распределением поля в зазоре и достигаемой разрешающей способностью радиоспектрометра ЯМР высокого разрешения. Связь между распределением остаточной индукции и распределением поля в зазоре установлена как для описанных выше искусственно создаваемых путем локальной пластической деформации структурных неоднородностей наконечников (рис. 3), так и для реальных неоднородностей, образующихся в процессе технологической обработки. При этом рассматривались неоднородности поля порядка  $10^{-3}$  Т,  $10^{-6}$  Т,  $10^{-8}$  -  $10^{-9}$  Т, связанные с различной степенью структурных нарушений материала наконечников. Показано, что остаточная индукция учитывает совокупное влияние различных структурных неоднородностей в достаточной степени, чтобы по ее неоднородному распределению судить об их влиянии на распределение поля в зазоре.

Практическое использование указанной взаимосвязи позволило разработать условия термической и механической обработки, обеспечивающие высокую структурную однородность материала полусных наконечников, осуществлять эффективный контроль структурных неоднородностей.

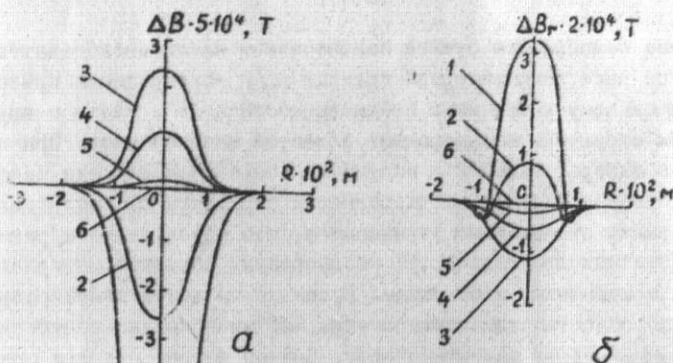


Рис. 3. Взаимосвязь между распределением индукции в зазоре над зоной локальной структурной неоднородности полюсного наконечника из сплава 49КФА-ЭЛ при  $B_0 = 2,35$  Т (а) и соответствующим распределением остаточной индукции вблизи лицевой поверхности (б). Температура стержня наконечника: 1 - исходное состояние, 2 -  $650^\circ\text{C}$ , 3 -  $700^\circ\text{C}$ , 4 -  $800^\circ\text{C}$ , 5 -  $900^\circ\text{C}$ , 6 -  $1000^\circ\text{C}$ .

родностей на стадии изготовления наконечников, а также корректировать, в случае необходимости, условия обработки с целью получения требуемой структуры. При этом задача улучшения однородности поля (повышения разрешающей способности радиоспектрометра ЯМР) была сведена к задаче создания такой структуры полюсных наконечников, которая обеспечивала наиболее однородное распределение остаточной индукции вблизи их лицевых поверхностей (рис. 4). Для получения высокого разрешения (2-3)  $\Gamma^{-9}$  на частотах 90 и 100 МГц технология обработки полюсных наконечников должна обеспечивать минимальную амплитуду неоднородности остаточной индукции, не превышающую (1-1,5)  $10^{-5}$  Т.

Испытано по достигаемой разрешающей способности ряд комплектов полюсных наконечников из сплава 49КФА-ЭЛ и стали Э12Ш, технология термической и механической обработки которых разработана на основе предложенной методики контроля по распределению остаточной индукции. Показано, что разработанные технологические условия обеспечивают получение высокородной структуры наконечников, позволяющей достичь высокого разрешения (2-3)  $10^{-9}$  в радиоспек-

тронетрах ЯМР на 90 и 100 МГц.

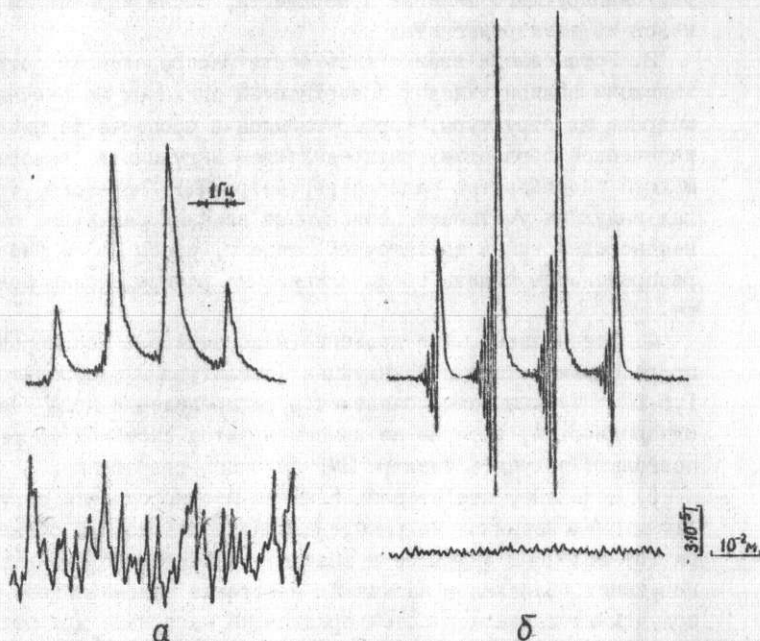


Рис. 4. Неоднородное (а) и однородное (б) распределение остаточной индукции вблизи лицевых поверхностей полюсных наконечников из сплава 49КФА-ЭД и соответствующие спектры ЯМР группы CHO ацетальдегида на частоте 100 МГц.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Установлено, что неоднородная структура полюсных наконечников, формирующаяся в процессе пластической деформации и термической обработки, изменяет относительную неоднородность поля в объеме образца ЯМР-преобразователя на величину  $10^{-8} - 10^{-9}$ .

2. Обоснована возможность контроля неоднородности структуры полюсных наконечников на стадии разработки технологии и в процессе изготовления по амплитуде неоднородного распределения остаточной индукции вблизи лицевых поверхностей. Разработана методика контроля неоднородности структуры полюсных наконечников, включающая их намагничивание до индукций, близких к насыщению материала, и запись на самописце распределения нормальной состав-

лящей остаточной индукции, измеряемой с помощью микроферросонда, сканирующего лицевые поверхности, после извлечения наконечников из электромагнита.

3. Установлена взаимосвязь между распределением остаточной индукции вблизи лицевых поверхностей полюсных наконечников, параметрами их структуры, формирующимися в процессе термической и механической обработки, распределением индукции в зазоре и разрешающей способностью радиоспектрометра ЯМР. Показано, что остаточная индукция учитывает совокупное влияние различных структурных неоднородностей в достаточной степени, чтобы по ее неоднородному распределению судить об их влиянии на распределение поля в зазоре.

4. Установлено, что полюсные наконечники с неоднородным распределением остаточной индукции (амплитуда неоднородности более  $1,5 \cdot 10^{-5}$  Т) вызывают появление в распределении поля в зазоре неоднородностей, которые не компенсируются системой коррекции и не позволяют получить спектры ЯМР высокого разрешения.

5. Показано, что степень влияния неоднородности структуры полюсных наконечников на распределение поля сложным образом зависит от величины индукции в зазоре и значительно уменьшается при индукциях, близких к насыщению материала наконечников. С учетом полученных закономерностей предложены материалы для полюсных наконечников радиоспектрометров ЯМР на 90 МГц (электротехническая сталь ЭИ2Ш) и 100 МГц (сплав 49КФА-ЭЛ).

6. Разработаны условия термической и механической обработки полюсных наконечников из сплава 49КФА-ЭЛ и электротехнической стали ЭИ2Ш, обеспечивающие требуемый уровень их структурных характеристик, позволяющий достичь высокого разрешения  $(2-3)10^{-9}$  при практической реализации отечественных радиоспектрометров ЯМР высокого разрешения на 90 и 100 МГц.

7. Результаты исследований использованы при разработке первого в стране радиоспектрометра ЯМР высокого разрешения на 90 МГц, опытного образца радиоспектрометра ЯМР высокого разрешения на 100 МГц и внедрены при серийном производстве первой партии отечественных радиоспектрометров ЯМР высокого разрешения РЯ2309 на 90 МГц в производственном объединении "Аналитрибор" (г. Смоленск).

Основные положения диссертации отражены в работах:

1. Анулов Н.С., Вонгриневич В.Л., Новиков С.А. Контроль однородности поверхностной магнитной структуры в прецизионных спла-



- вах FeCo. - В кн.: Неразрушающие методы и средства контроля. Минск, Наука и техника, 1973, с.296-304.
2. Акулов Н.С., Венгринович В.Л., Новиков С.А. Однородность магнитного поля и поверхностная магнитная структура полюсов в радиоспектрометрах ЯМР. В кн.: Достижения и проблемы радиоспектроскопии: Тез. докл. Всесоюзн. симп., 1973, с.47.
  3. Акулов Н.С., Венгринович В.Л., Новиков С.А. К вопросу о ядерном магнитном резонансе в неоднородном магнитном поле. - Докл. АН БССР, 1973, т.ХУП, № 3, с.211-214.
  4. Исследование влияния структуры магнитных материалов на однородность магнитного поля с целью создания прецизионных магнитных материалов для радиоспектрометров ЯМР высокого разрешения: Отчет о НИР В 370660/ОдНК АН БССР. - Минск, 1974. - 267 с.
  5. Венгринович В.Л., Новиков С.А., Бусько В.Н., Силивончик Л.Г. О возможности контроля температурных границ  $(\alpha + \gamma)$ -области в сплавах пермендюр по изменению магнитной проницаемости. - В кн.: Многопараметровый неразрушающий контроль ферромагнитных материалов: Тез. докл. республ. семинара. Минск, 1975, с.33-35.
  6. Венгринович В.Л., Новиков С.А. Методы улучшения однородности поля в зазоре электромагнитов в радиоспектроскопии ЯМР. - В кн.: Физические методы и средства неразрушающего контроля. Минск, 1976, с.218-235.
  7. Истиков С.А., Силивончик Н.Г., Венгринович В.Л. Исследование влияния шлифования на магнитную и кристаллическую структуру поверхностного слоя сплава пермендюр. - Известия АН БССР, сер. физ.-техн. наук, 1976, № 4, с.83-86.
  8. Венгринович В.Л., Новиков С.А., Бусько В.Н., Силивончик Н.Г. Исследование упрочненного состояния сплавов FeCo-2V, обусловленного шлифованием поверхности. - Физ. и хим. обраб. матер., 1976, № 4, с. 103-107.
  9. Бусько В.Н., Венгринович В.Л., Козлов А.Г., Лухвич А.А., Новиков С.А. и др. Исследование физических свойств и структуры упорядочивающихся сплавов FeCo-2V. - Тезисы докладов V Всесоюзного совещания по упорядочению атомов и влиянию упорядочения на свойства сплавов. Томск, 1976, с.222.
  10. Венгринович В.Л., Лухвич А.А., Новиков С.А., Савицкий А.А. Влияние формы и материала полюсных наконечников на однородность поля в магнитах. - Приб. и техн. эксперим., 1977, № 4, с.243-246.

- II. Vengrinovitch V.L., Lukhvitsh A.A., Novikov S.A., Savitsky A.A. Influence of the edges parts saturation on the field homogeneity in magnets for the high resolution NMR spectrometers. - 6 International Conference on Magnet Technology, Bratislava, 1977, p.415-418.
12. Арбузов А.И., Новиков С.А. Исследование магнитной микронеоднородности сплава FeCo-2V. - В кн.: Новые физические методы и средства контроля промышленных изделий: Тез. докл. Второй Белорусск. республ. научно-техн. конф., Минск, 1978, с.279-282.
13. Новиков С.А. Исследование кристаллической структуры магнитно-мягких железокобальтовых сплавов. - В кн.: Новые физические методы и средства контроля промышленных изделий: Тез. докл. Второй Белорусск. республ. научно-техн. конф., Минск, 1978, с. 285-289.
14. Арбузов А.И., Новиков С.А. Влияние условий деформирования и отжига на магнитные свойства и структуру сплава FeCo-2V. - В кн.: Физические свойства металлов и проблемы неразрушающего контроля. Минск, Наука и техника, 1978, с.195-198.
15. А.с. 638628 (СССР). Магнитный сплав. Н.С.Акулов, В.А.Грацианов, В.Л.Венгринович, В.П.Овчаров, Т.А.Хохлова, С.А.Новиков и др. - Спубл. в Б.И., 1978, № 47.
16. Проведение работ по исследованию новых магнитных сплавов с высокой индукцией насыщения, разработка технологии изготовления полюсных наконечников и разработка системы коррекции радиоспектрометров ЯМР высокого разрешения с рабочей частотой 100 МГц: Отчет о НИР Б 715595/ОФНК АН БССР. - Минск, 1978. - 104 с.
17. А.с. 688533 (СССР). Способ термической обработки полюсных наконечников из железокобальтовых сплавов. А.А.Лухвич, А.И.Арбузов, С.А.Новиков. - Спубл. в Б.И., 1979, № 36.
18. Разработка теории взаимосвязи физических свойств и структуры металлов с целью прогнозирования разрушения и получения материалов с заданными свойствами: Отчет о НИР Б907511/ИПФ АН БССР. - Минск, 1980. - 357 с.
19. Новиков С.А. Влияние условий термической обработки на неоднородность кристаллической структуры сплава FeCo-2V. - Известия АН БССР, сер. физ.-техн. наук, 1981, № 1, с.101-105.

Ба 180298

Дзяржаўная  
бібліятэка  
БССР  
Імя У. І. Леніна

AT 05610 Подписано к печати 21.04.82 г.  
Формат 60 84 1/16. Объем печ.л. 1,0. Тираж 100 экз.  
Заказ 490 Бесплатно.

---

Отпечатано на роталпринте ИНДМАШ АН БССР,  
Минск, Академическая, 12

М. В. Виноградов  
Витамин

Бол. оддээд  
1994 г.



80000003703370