

На правах рукописи



Иванов Олег Геннадьевич

**ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ
СВОЙСТВ И РАЗРАБОТКА НОВЫХ АМОРФНЫХ
МАГНИТОМЯГКИХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ
КОБАЛЬТА**

Специальность 01.04.07 -
физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 2004

Работа выполнена в открытом акционерном обществе «Научно-исследовательский институт материалов электронной техники»

Научный руководитель: кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
Чернов В.С.

Официальные оппоненты: доктор технических наук
Стрельченко С.С.
кандидат технических наук
Гаврилин В.А.

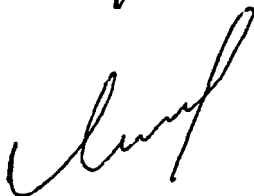
Ведущая организация: ФГУП Научно-исследовательский
учебный центр новых технологий
и материалов «АТОМ», г. Москва

Защита состоится "18" 02 2004 г. в 14 час. 30 мин. на
заседании диссертационного совета Д212.141.17 в Московском
государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по
адресу: 248600, г. Калуга, ул. Баженова, д. 4, КФ МГТУ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке КФ МГТУ
им. Н.Э. Баумана

Автореферат разослан "17" сентября 2004 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.т.н., доцент



Лоскутов С.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Аморфные металлические сплавы, являясь относительно новым классом прецизионных материалов, тем не менее, уже получили самое широкое применение в различных областях науки и техники. Это обусловлено уникальным сочетанием физико-механических свойств аморфных сплавов (АС), практически недостижимом в традиционных кристаллических материалах.

Наиболее эффективным в настоящее время является применение АС, в частности, на основе кобальта, в качестве магнитомягких материалов.

Несмотря на большое количество работ, посвященных изучению свойств АС на основе кобальта, в этой области остается еще немало вопросов, требующих решения, особенно в свете больших перспектив применения данных материалов в высокочастотных трансформаторах современной электронной техники. Немногочисленны и подчас противоречивы сведения о влиянии технологических условий получения и геометрических размеров аморфных лент на их свойства в исходном (после сверхбыстрой закалки расплава) состоянии.

Кроме того, отсутствуют систематические данные о зависимости свойств АС на основе кобальта от важнейших параметров термообработки, таких, например, как скорость охлаждения после отжига в магнитном поле и без него. Недостаточно ясной остается роль магнитострикции и влияние ее изменения при термообработке на формирование магнитных свойств. Актуальной является задача повышения эффективности термомагнитной обработки наряду с минимизацией времени на ее проведение в условиях массового производства изделий из АС.

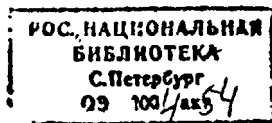
Важнейшей проблемой является разработка параметрического ряда АС на основе кобальта для использования в электромагнитных компонентах, соответствующих международным стандартам, например, в импульсных трансформаторах цифровых систем связи (ISDN).

Цель настоящей работы заключалась в исследовании закономерностей формирования и оптимизации физических свойств и разработке новых аморфных магнитомягких сплавов на основе кобальта для сердечников высокочастотных трансформаторов различного назначения.

Для достижения этой цели ставились и решались следующие задачи:

1. Изучить влияние условий получения (длины и толщины ленты, температуры разлива, материала закалочного диска и других факторов) на магнитные свойства аморфных лент на основе кобальта.

2. Выявить закономерности изменения свойств аморфных сплавов при термической и термомагнитной обработке в зависимости от следующих параметров: температуры и времени, скорости охлаждения, температуры



Кюри сплавов, температурной зависимости магнитострикции насыщения и исходного состояния лент.

3. Выяснить роль химического состава (легирующих присадок) и связанной с ним температуры Кюри в формировании гистерезисных магнитных свойств лент в исходном состоянии (после закалки расплава) и после термической обработки.

4. Оптимизировать процесс термомагнитной обработки изделий из АС в условиях массового производства.

5. Разработать параметрический ряд магнитомягких АС на основе кобальта с околонулевой магнитострикцией и проанализировать взаимосвязь различных свойств сплавов между собой.

6. Испытать и внедрить разработанные сплавы АМАГ в изделиях электронной техники, в частности, в высокочастотных импульсных трансформаторах и сердечниках насыщения магнитных усилителей.

Научная новизна данной диссертационной работы состоит в следующем:

- Впервые проведено комплексное изучение влияния условий получения на магнитные свойства аморфных лент на основе кобальта и даны рекомендации по изготовлению лент с заданными свойствами.

- Получены данные о факторах, способствующих проявлению при термообработке структурной «наследственной» анизотропии получения.

- Выявлены закономерности влияния параметров отжига и температуры Кюри сплавов, температурной зависимости магнитострикции насыщения и исходного состояния лент на свойства аморфных сплавов при термообработке.

- Предложена новая схема термомагнитной обработки аморфных лент - кратковременный двухступенчатый отжиг.

- Определены закономерности влияния легирования на свойства аморфных сплавов на основе кобальта.

- Разработан параметрический ряд новых аморфных сплавов типа АМАГ.

- Определен характер взаимосвязи структурно-нечувствительных и структурно-чувствительных свойств таких сплавов между собой.

- Получены результаты испытаний разработанных сплавов в производстве сердечников высокочастотных трансформаторов и показана эффективность их применения.

Практическая ценность работы заключается в том, что ее научные результаты могут быть использованы для:

- получения аморфных лент на основе кобальта с заданными свойствами в исходном (неотожжённом) состоянии;

- выбора оптимальных режимов термической и термомагнитной обра-

ботки аморфных магнитомягких сплавов на базе системы Co-Fe-Si-B с близкой к нулю магнитострикцией;

- создания научных основ и разработки новых аморфных сплавов на основе кобальта с заданным комплексом свойств;

- дальнейшего углубления представлений о физических процессах, проходящих в аморфных лентах при получении и последующей термообработке;

- практического применения разработанных сплавов в изделиях электронной техники.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Зависимости магнитных свойств аморфных лент на основе кобальта от условий получения: уменьшение толщины и длины ленты, снижение температуры разливки и увеличение температуры Кюри повышают коэффициент прямоугольности петли гистерезиса и максимальную проницаемость, снижают начальную проницаемость и статическую коэрцитивную силу. Повышению прямоугольности петли способствуют также переход на более теплопроводный материал диска (т.е. увеличение скорости закалки) и более длинный контакт ленты с диском. В соответствии с предложенной моделью формирования магнитной анизотропии при спиннинговании прямоугольность растет при увеличении параметра ΔT , равного разности температуры Кюри сплава и температуры ленты в месте схода ее с закалочного диска.

2. Условия максимальной реализации эффекта структурной «наследственной» анизотропии получения в аморфных лентах, проявляющегося после термообработки при температуре отжига выше температуры Кюри в форме самопроизвольной продольной магнитной анизотропии:

- низкая магнитострикция;

- повышенная разница между температурами кристаллизации и Кюри;

- температура отжига, достаточная для релаксации напряжений.

3. Экстремальная температурная зависимость магнитострикции сплава АМАГ 171 (с двойным изменением ее знака), оказывающая непосредственное влияние на формирование магнитных свойств при отжиге.

4. Зависимости магнитных свойств от скорости охлаждения при отжиге и получение наилучших характеристик при сохранении их достаточной временной стабильности в диапазоне от 100 до 400 °С/мин. Двухступенчатый режим термомагнитной обработки аморфных сплавов, обеспечивающий сокращение общего времени отжига более чем в 2 раза и позволяющий надежно регулировать угол наклона петли гистерезиса по сравнению с традиционной одноступенчатой обработкой.

5. Зависимости структурно-нечувствительных свойств сплавов системы Co-Fe-Ni-Cr-Si-B от концентрации Ni, Cr, Si, B, имеющие линейный харак-

тер (в пределах исследованных диапазонов). Зависимость начальной магнитной проницаемости от концентрации как металлов, так и металлоидов имеет максимум в области сплавов с температурой Кюри 220-240 °С и коэффициентом прямоугольности 0,1-0,25. Высота этого пика максимальна у сплавов с магнитострикцией, близкой к нулю (содержание Ni 9-10 ат.%). Параметрический ряд аморфных магнитомягких сплавов типа АМАГ, взаимосвязь их свойств между собой и результаты испытаний в изделиях электронной техники.

Апробация работы и публикации. Основные результаты работы докладывались на 7 отечественных и международных конференциях, в том числе на III Межотраслевом совещании «Производство, обработка и применение аморфных и микрокристаллических сплавов» (Аша, 1987), Всесоюзной научно-технической конференции «Проблемы исследования структуры и свойств быстрозакалённых металлических сплавов» (Москва, 1988), на V Всесоюзной конференции «Аморфные прецизионные сплавы: технология, свойства, применение» (Ростов Великий, 1991), на VI Международном совещании «Аморфные прецизионные сплавы: технология, свойства, применение» (Боровичи, 1996), региональной научно-практической конференции, посвященной Дню Науки «Инновационное развитие: достижения ученых Калужской области для народного хозяйства» (Обнинск, 1999), на VII Всероссийской конференции с международным участием «Аморфные прецизионные сплавы: технология - свойства - применение» (Москва, 2000), на III Международной научно-технической конференции «Электроника и информатика - XXI век» (Зеленоград, 2000).

Материалы диссертации изложены в 21 научной статье.

Личный вклад автора. Автору принадлежит конкретизация решаемых задач, определение методов и подходов к решению поставленных задач, экспериментальные исследования, обработка и обобщение полученных результатов.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, содержит 148 машинописных листов, включая 41 рисунок, 10 таблиц, список литературы из 136 наименований и 2 приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследований, сформулированы цели и задачи диссертационной работы, раскрывается ее научная новизна и практическая значимость, обосновываются основные положения, выносимые на защиту, аннотировано изложено ее содержание по главам.

В первой главе на основе литературных данных проведен анализ современного состояния разработки и исследований свойств аморфных спла-

ВОВ. Рассмотрены факторы образования и методы получения АС, особенности их свойств, включая механические, химические и электрические. Особое внимание уделено АС как магнитомягким материалам и факторам, определяющим их свойства: условиям получения, химическому составу, термической и термомагнитной обработке.

Во второй главе изучалось влияние условий получения на свойства лент из аморфных магнитомягких сплавов на основе кобальта.

В процессе выполнения работы из различных сплавов на основе кобальта базовой системы Co-Fe-Si-B были получены аморфные ленты шириной от 0,7 до 20 мм, толщиной от 10 до 35 мкм и длиной до 400 м. Ленты изготавливались методом «спиннингования» - закалкой расплава на наружной поверхности быстровращающегося бронзового диска.

Измерения статических магнитных свойств проводили баллистическим методом на установке У5045 по ГОСТ 8.377-80. Относительную магнитную проницаемость μ при частотах от 1 кГц до 1 МГц измеряли на мостах переменного тока Р-571, Р5016 и Е7-12.

Константу магнитострикции насыщения λ_s определяли методом малоуглового вращения вектора намагниченности, суть которого состоит в следующем. Через прямую ленту, намагниченную до насыщения вдоль главной оси ленты, пропускался переменный ток, вызывающий отклонение вектора намагниченности от главной оси ленты. При изменении напряженности продольного магнитного поля и величины приложенных вдоль ленты напряжений в случае постоянства угла между главной осью ленты и вектором намагниченности можно рассчитать λ_s .

Температуру кристаллизации $T_{кр}$ находили методом дифференциально-термического анализа (ДТА) при скорости нагрева 10 К/мин. Точку Кюри T_c определяли по температурной зависимости проницаемости μ' . Удельные потери на перемагничивание измерялись «суммо-разностным» методом в диапазоне частот от 20 до 100 кГц при индукции 0,2 Тл.

В процессе спиннингования аморфная лента проходит три стадии охлаждения. На I стадии происходит собственно закалка расплава и формирование («намораживание» на диске) аморфной ленты заданной толщины и ширины в «лужице» расплава между выпускным соплом и диском. Данная стадия характеризуется возникновением структурной анизотропии в ленте вдоль ее оси в направлении движения.

На II стадии происходит охлаждение уже затвердевшей ленты на диске. Это зона возникновения остаточных термических напряжений в ленте. III стадия - это охлаждение слетевшей с диска ленты на воздухе. На стадиях II и/или III происходит формирование магнитной доменной структуры.

При рассмотрении магнитных свойств лент в зависимости от техноло-

гических факторов их получения основное внимание уделялось коэффициенту прямоугольности петли гистерезиса K_n , т.к. этот параметр в наиболее полной мере характеризует магнитную анизотропию и в значительной степени определяет остальные структурно-чувствительные свойства. Ленты разной толщины одинакового химического состава ($T_c \approx 285^\circ\text{C}$) обладают различной магнитной анизотропией в исходном состоянии: от продольной с высокими значениями K_n в тонких лентах до преимущественно поперечной с низкими значениями K_n - в толстых. Кроме того, K_n меняется по длине лент (рис. 1), причем наиболее динамично (от значений 0,6-0,7 в начале до уровня 0,1-0,3 в конце) - в лентах средней толщины (15-18 мкм). В тонких (~10 мкм) лентах K_n остается стабильно высоким (~0,8) в пределах рассмотренной длины. В толстых лентах (25 - 35 мкм) K_n сначала уменьшается до значений 0,1-0,3, а затем постепенно растет к концу лент вследствие «самоотжига».

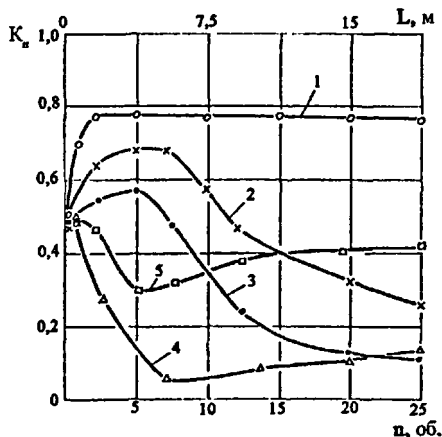


Рис. 1. Зависимость коэффициента прямоугольности K_n сплава АМАГ 176 от количества оборотов диска n (длины ленты L). Обозначения 1,2,3,4,5 - ленты толщиной 10,15, 18,25 и 35 мкм, соответственно.

В целом, K_n увеличивается при уменьшении температуры разливки, при* увеличении длины контакта ленты с закалочным диском и при переходе с бронзового диска на медный.

Характер изменения K_n по длине ленты в значительной степени зависит также от температуры Кюри материала. Так, при переходе от сплава АМАГ 186 с высокой $T_c = 430^\circ\text{C}$ к сплаву АМАГ 170 с низкой $T_c = 200^\circ\text{C}$ происходит постепенное изменение преобладающей магнитной анизотропии - от продольной ($K_n \sim 0,97$) к поперечной ($K_n \sim 0,15$).

В общем случае на формирование магнитной анизотропии в лентах при спиннинговании определяющую роль оказывает величина параметра ДТ, равного разности T_c сплава и температуры ленты в месте схода ее с закалочного диска. Коэффициент прямоугольности растет при увеличении АТ.

В третьей главе изучены закономерности изменения свойств АС в зависимости от термической и термомагнитной обработки.

При термообработке ниже T_c по мере увеличения температуры отжига $T_{отж}$ происходит постепенное разрушение магнитной анизотропии, приобретенной лентами в процессе изготовления. Далее при $T_{отж} > T_c$ (термообработка без магнитного поля - ТО) в ряде сплавов проявляется самопроизвольная продольная магнитная анизотропия. Она может быть связана со структурной «наследственностью», приобретаемой лентами при получении, когда в процессе спиннингования при относительно высоких температурах и воздействии механических и термических напряжений (преимущественно растяжения) в ленте могут происходить необратимые деформации и структурная перестройка. Как показали исследования, условиями максимальной реализации данного эффекта являются:

1) Повышенная разница $\Delta T = T_{кр} - T_c$. Так, у сплава АМАГ 183А при $\Delta T = 140$ °С максимальный K_n после ТО при $T_{отж} > T_c$ равен $\sim 0,48$, у сплава АМАГ 176 ($\Delta T = 240$ °С) $K_n \sim 0,62$, а у сплава АМАГ 171 ($\Delta T = 300$ °С) $K_n \sim 0,9$ (рис. 2).

2) Достаточно высокая температура отжига, необходимая для релаксации напряжений.

3) Низкая магнитострикция. Например, в сплаве $(CoFe)_{67}Ni_3Cr_3(SiB)_{25}$, имеющем $\lambda_s = 6 \cdot 10^{-7}$, после ТО без поля $K_n = 0,65$, а в сплаве АМАГ 171 ($\lambda_s = 1 \cdot 10^{-7}$) $K_n = 0,91$. При этом оба сплава имеют одинаковые структурно-нечувствительные свойства (B_s ; T_c ; $T_{кр}$).

Зависимость λ_s сплава АМАГ 171 от температуры имеет экстремальный характер. При $T_{отж} = 200-250$ °С константа λ_s меняет знак с отрицательного на положительный, а при $T_{отж} \sim 430$ °С - наоборот. Пластичность ленты снижается скачком при $T_{отж} > 320$ °С (время 30 минут). Процесс релаксации напряжений в материале завершается при $T_{отж} = 380-420$ °С. Особенностью

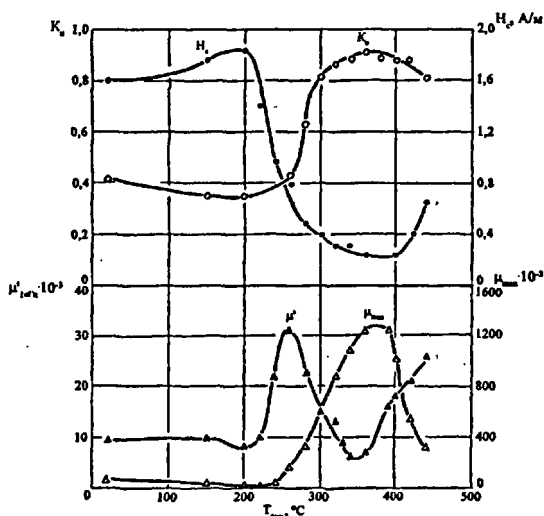


Рис. 2. Влияние температуры отжига на коэффициент прямоугольности K_n , коэрцитивную силу H_c , начальную $\mu'_{1кГц}$ и максимальную μ_{max} магнитную проницаемость сплава АМАГ 171.

сплава АМАГ171 является возможность получения довольно высокого уровня μ' при низкотемпературной ТО (240-260 °С, 30 мин.) (см. рис. 2). Это может быть связано с тем, что $\lambda_s \sim 0$ при данных температурах. При термомагнитной обработке в поперечном магнитном поле (ТМО H_{\perp}) оптимальные магнитные характеристики достигаются в температурном интервале 380-430 °С (здесь λ_s снова приближается к нулю). При этом $K_n < 0,1$; $H_c = 0,16$ А/м; $\mu' \geq 100000$. Минимальные значения потерь на перемагничивание и максимальные величины высокочастотной проницаемости $\mu'_{10кГц}$ также наблюдаются при $\lambda_s \approx 0$.

При изучении зависимости магнитных свойств сплава АМАГ 176 от скорости охлаждения $V_{\text{охл}}$ после отжига наиболее интересным оказался интервал от 100 до 400 °С/мин. При таких скоростях уже не проявляет себя процесс стабилизации границ доменов, поэтому H_c слабо зависит от $V_{\text{охл}}$ и одинакова для ТО и ТМО H_{\perp} . Начальная проницаемость μ' при ТМО H_{\perp} с т и гает своего пикового значения $\sim 95\ 000$, что очень высоко для сплавов типа АМАГ 176 с повышенными значениями индукции и температуры Кюри. Подобный результат, видимо, можно объяснить продолжающимся (и увеличивающимся в данном интервале $V_{\text{охл}}$) процессом дробления доменной структуры в условиях быстрого охлаждения, наряду с сохранением преимущественно поперечной ориентации доменов. При повышении частоты перемагничивания зависимость $\mu'_{10кГц}$ от $V_{\text{охл}}$ значительно ослабевает.

Для изучения временной стабильности $\mu'_{10кГц}$ после термообработки выбраны три варианта охлаждения - медленное ($V_{\text{охл}} = 10$ °С/мин.), быстрое (250 °С/мин.) и сверхбыстрое с скоростью $\sim 3 \cdot 10^4$ °С/мин. (закалка в воде). Наилучшим сочетанием уровня и стабильности μ' характеризуется термообработка с $V_{\text{охл}} = 250$ °С/мин. По результатам проведенных исследований был разработан способ термической обработки аморфных магнитомягких сплавов.

Для сокращения времени и повышения эффективности термообработки предложен двухступенчатый режим ТМО H_{\perp} . На первой ступени при температуре отжига T_1 при условии, когда $T_{\text{кр}} > T_1 > T_c$, снимаются внутренние напряжения, проходят процессы гомогенизации аморфной фазы с выходом избыточного свободного объема. При выдержке на второй ступени при $T_2 < T_c$ формируется требуемая магнитная анизотропия. Например, двухступенчатая термообработка в поперечном магнитном поле при температурах $T_1 = 440$ °С и $T_2 = 225$ °С (время выдержки при каждой температуре 5 мин.) приводит к снижению K_n и H_c при сохранении $\mu'_{10кГц}$ по сравнению с одноступенчатым отжигом при температуре 420 °С в течение 20 мин. и скоростью охлаждения после отжига 5 °С/мин. При этом общая продолжительность ТМО уменьшается с 88 до 31 минуты. Двухступенчатый режим ТМО

применяется для отжига сердечников в проходных печах непрерывного действия ОАО «Мстатор» (г. Боровичи Новгородской обл.).

ТО и ТМО при $T_{отж} > T_c$ значительно улучшают гистерезисные свойства аморфных лент, одновременно выравнивая их по длине. Эффект «стирания» исходной анизотропии наблюдается также в том, что большинство магнитных характеристик ($K_n, \mu_{max}, \mu'_{1кГц}, H_c$), претерпевающих сильные изменения от толщины лент в неотожжённом состоянии, после обоих видов термообработки практически не зависят от толщины. В то же время высокочастотные свойства материала (проницаемость $\mu'_{1МГц}$ и удельные потери $P_{0,2/100кГц}$) монотонно, практически по линейному закону ухудшаются с увеличением толщины ленты. Обнаружено уменьшение K_n после ТО без поля в лентах, полученных при высокой температуре разливки.

В четвертой главе изучено влияние состава (легирующих присадок) на свойства сплавов, а также приведены данные по исследованию и разработке новых сплавов типа АМАГ.

В качестве основы для исследований была выбрана система Co-Fe-Ni-Cr-Si-B. Содержание бора изменялось от 11,5 до 14,5 ат.%. При этом структурно-нечувствительные свойства, не зависящие от термообработки, изменяются монотонно, почтилинейно: индукция насыщения B_{10} и T_c уменьшаются, а $T_{кр}$ растет, λ_s слабо зависит от концентрации бора, находясь на уровне $+(0,3 \pm 0,6) \cdot 10^{-6}$. Поведение структурно-чувствительных свойств после ТМО H_1 не столь однозначно и определяется, видимо, величиной T_c . При малом содержании бора (высокая T_c) наблюдается выраженная поперечная магнитная анизотропия ($K_n < 0,1$) с низкими $\mu'_{1кГц}$ и μ_{max} . Увеличение концентрации бора в сплаве, приводя к уменьшению T_c , повышает K_n, μ_{max} и H_c . Начальная проницаемость μ' проходит через максимум (~ 64000) при содержании бора около 13 ат.% ($T_c \cong 220^\circ\text{C}$). Вид кривых $\mu', \mu_{max}, K_n, H_c$ позволяет говорить об аналогичности влияния на магнитные свойства (при ТМО H_1) повышения $V_{охл}$ и снижения T_c . Присадки кремния (в диапазоне концентраций 12,6-13 ат.%) влияют на характеристики подобно бору. В отличие от металлоидов, увеличение содержания никеля в сплаве от 5 до 11 ат.% (за счет пропорционального уменьшения всех остальных элементов) приводит к снижению $T_{кр}$, повышению B_{10} и T_c . Эти изменения также имеют линейный характер, но проходят менее интенсивно по сравнению с металлоидами (из расчета на 1% добавки), λ_s снижается, проходя через ноль при введении $\sim 9,5$ ат.% Ni. При этих же концентрациях никеля K_n и H_c достигают своего минимума, далее не изменяясь, а начальная проницаемость проходит через пик. Однако, пиковый уровень $\mu'_{1кГц} \cong 90000-95000$, что значительно превышает проницаемость сплавов с переменным бором, обладающих более высокой магнитострикцией. Кроме того, для сплавов, содержа-

ших **9–10 ат.% Ni**, характерны минимальные удельные потери и максимальные значения $\mu'_{\text{1МГц}}$. Влияние присадок хрома в диапазоне концентраций 1,5–4,5 ат.% на свойства АС оказалось аналогичным влиянию металлоидов,

По результатам проведенных исследований разработаны параметрический ряд аморфных магнитомягких сплавов типа АМАГ на основе кобальта и технология их производства в виде мерных лент шириной 0,7–25 мм и толщиной 15–25 мкм по техническим условиям Яе0.021.180ТУ. По химическому составу и комплексу магнитных свойств разработанные сплавы можно разделить на три основные группы:

Первая группа сплавов (АМАГ 170, АМАГ 171, АМАГ 172) характеризуется пониженными значениями температуры Кюри $T_c=200–235\text{ }^\circ\text{C}$, относительно небольшой индукцией насыщения $B_{10}=0,55–0,6\text{ Тл}$, высоким уровнем начальной проницаемости $\mu'=70000–100000$ после ТМО H_1 . При этом петли гистерезиса линейны до полей от 0,8 до 3,5 А/м. Сплавы этой группы склонны к появлению в лентах самопроизвольной продольной магнитной анизотропии в процессе ТО без магнитного поля.

Вторая группа сплавов (АМАГ 176, АМАГ 179, АМАГ 180) имеет $B_{10}=0,65–0,68\text{ Тл}$, $T_c=265–285\text{ }^\circ\text{C}$ и достаточно высокий уровень $\mu'=25000–50000$. Максимальные поля линейности после ТМО H_x – от 7 до 15 А/м.

Третья группа сплавов (АМАГ 183, АМАГ 186, АМАГ 187) обладает наибольшими значениями $B_{10}=0,75–0,95\text{ Тл}$ и $T_c \geq 340\text{ }^\circ\text{C}$. Низкая проницаемость после ТМО H_1 – от 1300 до 10000 обеспечивает линейность петель до полей от 80 А/м до 480 А/м. Ленты этих сплавов в исходном состоянии отличаются продольной магнитной анизотропией, приобретенной в процессе изготовления.

В целом с ростом индукции в сплаве $T_{\text{кр}}$ падает, а T_c растет практически по линейному закону (рис. 3). Проницаемость после ТМО H_1 обратно пропорциональна индукции сплава, за исключением составов с $B_{10} > 0,75\text{ Тл}$. По мере роста B_{10} и T_c в сплавах монотонно снижается K_n после ТМО H_1 и повышается после ТМО H_{II} . H_c практически одинакова у сплавов из 1-й и 2-й группы и растет у высокоиндукционных сплавов.

Пятая глава посвящена испытанию и внедрению разработанных сплавов в производстве высокочастотных трансформаторов.

Применение мерных лент АС, в частности, из сплавов АМАГ 183 и АМАГ 176 взамен пермаллоев при производстве микротрансформаторов в ОАО «Мстатор» (г. Боровичи Новгородской обл.) позволило в 2 раза уменьшить число операций при изготовлении магнитопроводов и избавиться от недостатков технологического процесса, присущих пермаллоям. В частности, появилась возможность исключить операции резки, обезжиривания, нанесения изоляционного покрытия и изготовления суспензии, очистки лент,

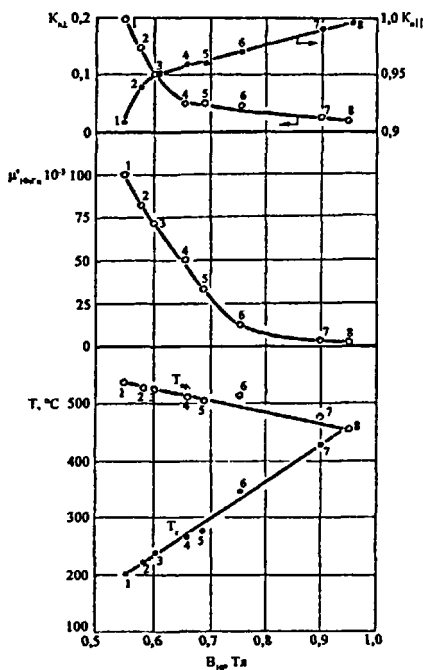


Рис. 3. Зависимости от индукции B_{10} температур Кюри T_c и кристаллизации $T_{кр}$, относительной магнитной проницаемости μ' при частоте 10 кГц и коэффициента прямоугольности после ТМО в поперечном (K_{11}) и продольном (K_{12}) полях в сплавах АМАГ 170 (1), АМАГ 171 (2), АМАГ 172 (3), АМАГ 179 (4), АМАГ 180 (5), АМАГ 183 (6), АМАГ 186 (7), АМАГ 187 (8).

малым потерям. Сердечники насыщения серии АМСА фирмы АМОС (Южная Корея), выпускаемые на базе лент АМАГ, превосходят по комплексу параметров поток, H_c и K_n при частоте 100 кГц) аналогичные изделия таких фирм, как Honeywell (США), TOSHIBA (Япония), Vacuumschmelze (Германия). Причем, K_n сердечников фирмы АМОС после ТМО в продольном поле и ТО без поля практически не отличаются ($\geq 0,97$ и $\geq 0,96$, соответственно). На базе сплавов АМАГ 171 и АМАГ 172 корейской компанией в сотрудничестве с ОАО "Мстатор" разработан большой ряд сер-

высокотемпературного вакуумного отжига. Трудоемкость изготовления микротрансформаторов снизилась почти в 2 раза. Коэффициент использования материала увеличился с 0,38 до 0,76, а выход годных изделий повысился с 82 до 95 %. Стало возможным создание гибкого автоматизированного производства микротрансформаторов. Улучшились и технические параметры самих трансформаторов - импеданс, индуктивность, произведение длительности импульса на его амплитуду. Масса трансформатора ТИЛ2 с применением ленты АМАГ 176 в 2 раза меньше, а объем в 3,7 раза меньше, чем у аналога - трансформатора ТИЛ 1В с использованием пермаллоя 79 НЗМ.

Применение сплавов АМАГ 171 и АМАГ 172 в сердечниках насыщения магнитных усилителей для высокочастотных источников питания оказалось эффективным благодаря достаточно высокой индукции материалов, повышенной прямоугольности петли гистерезиса, низкой динамической коэрцитивной силе и

денников насыщения высокого качества.

Еще одной важной областью применения разработанной серии сплавов АМАГ являются системы телекоммуникации ISDN, использующие многофункциональные цифровые линии связи с высокой плотностью передачи информации. В ISDN применяются малогабаритные высокочастотные импульсные трансформаторы, работающие при токах подмагничивания от 1 мА (трансформатор S_0 на базе сплава АМАГ 170) до 10,2 А (трансформатор типа U_{k_0} на базе сплава АМАГ 187). В серийном производстве сердечников параметрического ряда ISDN в ОАО "Мстатор" используется высокопроизводительный двухступенчатый режим ТМО в проходных печах собственной разработки. Особенности индуктивных компонентов на базе АС семейства АМАГ являются:

- уменьшение габаритов изделий в соответствии со стандартом ИТУ-Т 1.430 международного телекоммуникационного союза;
- высокий импеданс в широком диапазоне частот;
- низкие потери в сердечниках;
- пониженное энергопотребление в телекоммуникационном оборудовании.

В приложениях приведены акты внедрения и использования в производстве разработанных в диссертационной работе материалов.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Исследовано влияние ряда технологических факторов при получении аморфных лент спиннингованием (длина и толщина ленты, температура разливки, материал закалочного диска, длина контакта ленты с диском), а также температуры Кюри аморфных лент на основе кобальта на магнитную анизотропию лент и их структурно-чувствительные свойства (коэффициент прямоугольности K_n , начальную магнитную проницаемость μ' , максимальную проницаемость μ_{max} и коэрцитивную силу H_c).

Отмечено, что уменьшение толщины, длины ленты и температуры разливки и увеличение T_c повышают K_n и μ_{max} , уменьшают μ' и H_c . Увеличение K_n наблюдается также при переходе с бронзового закалочного диска на медный и при более длинном контакте ленты с диском.

Предложена модель формирования магнитной анизотропии в лентах при спиннинговании, основанная на определяющей роли параметра ΔT , равного разности температуры Кюри сплава и температуры ленты в месте схода ее с закалочного диска. Показано, что при увеличении ΔT растет K_n .

2. Изучено влияние параметров термообработки (температуры, времени, скорости охлаждения после отжига) на магнитные и другие характеристики аморфных сплавов типа АМАГ. Установлено, что высокотемператур-

ная обработка значительно улучшает статические магнитные свойства сплавов, одновременно выравнивая их зависимость от длины и толщины ленты. При этом высокочастотные свойства - μ' при частоте 1 МГц, удельные потери $P_{0,2/100\text{Гц}}$ после отжига также улучшаются и выравниваются по длине лент, но ухудшаются с увеличением толщины.

3. Исследовалось явление структурной «наследственной» анизотропии получения в аморфных лентах, проявляющееся после термообработки при $T_{\text{отж.}} > T_c$ в форме самопроизвольной продольной магнитной анизотропии. Условиями максимальной реализации данного эффекта являются:

- низкая магнитострикция;
- повышенная разница $\Delta T = T_{\text{пр}} - T_c$;
- температура отжига, достаточная для релаксации напряжений.

Указанный эффект в наибольшей мере проявляется в сплавах АМАГ170, АМАГ171, АМАГ172.

4. Показано, что коэффициент прямоугольности петли гистерезиса K_n лент после термообработки (ТО) без магнитного поля уменьшается с повышением температуры разлива.

5. В сплаве АМАГ 171 обнаружена экстремальная зависимость магнитострикции λ_s от температуры отжига с двойным переходом ее через ноль в области низких и высоких температур. Такая особенность поведения λ_s оказывает непосредственное влияние на формирование магнитных свойств при отжиге:

- при низкотемпературной ТО без поля, не охрупчивающей ленту, возможно получение повышенной начальной проницаемости;
- высокотемпературная термомагнитная обработка в поперечном поле (ТМО H_{\perp}), после которой λ_s также близка к нулю, приводит к наиболее высокой магнитной проницаемости, наряду с низким K_n ;
- нулевым значениям магнитострикции соответствуют минимальные потери и наибольшая проницаемость $\mu'_{1\text{МГц}}$.

6. Обнаружено, что охлаждение после отжига со скоростью от 100 до 400 °С в минуту подавляет стабилизацию границ доменов, приводит к значительному улучшению магнитомягких характеристик - H_c , μ' , μ_{max} , особенно после ТМО в поперечном магнитном поле. Указанный диапазон скоростей охлаждения характеризуется наилучшим сочетанием высокой $\mu'_{1\text{МГц}}$ с ее достаточной временной стабильностью.

7. Предложен режим двухступенчатой ТМО, позволяющий значительно сократить общее время отжига и точно регулировать угол наклона линейной петли гистерезиса и, соответственно, значение μ' .

8. Исследовано влияние на свойства аморфных сплавов системы Co-Fe-Ni-Cr-Si-B легирующих присадок металлов (Ni, Cr) и неметаллов (ме-

таллоидов) - Si, В. Обнаружено, что зависимости структурно-нечувствительных свойств от концентрации каждого из элементов имеют линейный характер, что позволяет целенаправленно изменять свойства сплавов путем дозированного легирования указанными присадками. Зависимость начальной магнитной проницаемости от концентрации как металлов, так и металлоидов имеет максимум в области составов с $T_c = 220-240$ °С и $K_n = 0,1-0,25$. Высота пика проницаемости зависит от величины магнитострикции сплавов и принимает максимальное значение у составов с большим содержанием никеля (~ 9 - 10%), имеющих $\lambda_s \approx 0$.

9. На базе системы Co-Fe-Si-B разработан параметрический ряд аморфных магнитомягких сплавов типа АМАГ с широкой градацией по магнитным свойствам. Характерным признаком всей группы сплавов является низкий уровень магнитострикции.

Сделан анализ взаимосвязи структурно-нечувствительных (B_{10} , T_{np} , T_c) и структурно-чувствительных (μ'_{10kG} , H_c , K_n) свойств между собой. Показано, что с увеличением индукции в сплавах АМАГ увеличивается T_c , уменьшаются T_{np} и μ' , усиливается наведенная при ТМО магнитная анизотропия. Кроме того, при этом расширяется зона линейности на кривых намагничивания и ослабляется частотная зависимость проницаемости.

В ОАО «НИИМЭТ» организовано производство разработанных сплавов марок АМАГ по техническим условиям Яе 0.021.180 ТУ.

10. Разработанные сплавы АМАГ испытаны и внедрены в производство широкого спектра новых изделий электронной техники в России и за рубежом.

Использование лент АМАГ в микротрансформаторах в ОАО «Мстатор» дало возможность упростить технологический процесс изготовления изделий, избавить его от недостатков, присущих традиционным кристаллическим сплавам - пермаллоям. При этом снизилась трудоемкость, увеличился коэффициент использования материала, повысился выход годных изделий. Одновременно улучшились технические параметры микротрансформаторов.

Применение сплавов АМАГ 171 и АМАГ 172 в сердечниках насыщения магнитных усилителей позволило фирме AMOS (Южная Корея) совместно с ОАО «Мстатор» разработать и запустить в производство серию сердечников, превосходящих по комплексу параметров изделия ведущих мировых фирм - Honeywell, Vacuumschmelze, TOSHIBA.

На базе семейства сплавов АМАГ разработан параметрический ряд сердечников для трансформаторов и дросселей современных цифровых сетей с интегрированными функциями (ISDN), производство которых организовано в ОАО «Мстатор».

Основное содержание диссертации отражено в следующих работах:

1. Получение, свойства и применение аморфных магнитомягких сплавов типа АМАГ / В.С. Чернов, А.С. Евтеев, О.Г. Иванов и др. // *Металловедение и термическая обработка металлов.* - 1992. - №9. - С.5-8.
2. Магнитные свойства лент из аморфного сплава АМАГ 176 / В.С. Чернов, О.Г. Иванов, Б.Л. Штангеев, О.А. Левина // *Металловедение и термическая обработка металлов.* - 1992. - №9. - С. 19-21.
3. Chernov VS., Ivanov O.G., Pashchenko RE. Production and Properties of Amorphous Magnetically Soft Alloys AMAG // *Journal of Advanced Materials.* - 1994. - №1(4). - P.353-358.
4. Чернов В.С., Иванов О.Г., Евтеев А.С. Основные факторы формирования свойств аморфных магнитомягких сплавов // *Материаловедение.* - 2001. - №4(49). - С.38-43.
5. Чернов В.С., Иванов О.Г., Евтеев А.С. Основные условия стабильности технологии производства мерных лент из аморфных сплавов // *Сталь.* - 2001. - № 4. - С.67-69.
6. Свойства и применение аморфных магнитных сплавов типа АМАГ / В.С. Чернов, О.Г. Иванов, А.С. Евтеев и др. // *Сталь.* - 2001. - №6. - С. 100-101.
7. Иванов О.Г., Коржавый А.П. Свойства аморфных магнитно-мягких сплавов типа АМАГ // *Научно-технические технологии.* - 2002. - №5. - С.24-29.
8. Чернов В.С., Иванов О.Г., Евтеев А.С. Свойства аморфных магнитомягких сплавов АМАГ на основе кобальта // *Материаловедение.* - 2003. - № 10. - С. 23-25.
9. Свойства аморфных магнитомягких лент АМАГ 176 / В.С. Чернов, Б.Л. Штангеев, О.Г. Иванов, Е.Е. Ильина // *Производство, обработка и применение аморфных и микрокристаллических материалов: Тезисы докладов III Межотраслевого совещания-М., 1987.* - С.28-29.
10. Штангеев Б.Л., Чернов В.С., Иванов О.Г. Магнитные свойства аморфных лент на кобальтовой основе в зависимости от их толщины и длины // *Производство, обработка и применение аморфных и микрокристаллических материалов: Тезисы докладов III Межотраслевого совещания.* - М., 1987. - С.29.
11. А.с. 1459253 СССР. Способ термической обработки аморфных магнитомягких сплавов / Б.Л. Штангеев, В.С. Чернов, О.Г. Иванов, О.А. Левина // *Б.И.* - 1988. - № 7.
12. Влияние скорости охлаждения после отжига на магнитные свойства аморфных сплавов системы Co-Fe-Ni-Si-B / Б.Л. Штангеев, В.С. Чернов, О.Г. Иванов и др. // *Электронная техника. Сер. Материалы.* - 1989. - Вып.5(242). - С.20-23.

13. Получение, свойства и применение аморфных магнитомягких сплавов типа АМАГ / В.С. Чернов, А.С. Евтеев, О.Г. Иванов и др. // Аморфные прецизионные сплавы: технология, свойства, применение: Тезисы докладов V Всесоюзной конференции. - Ростов Великий, 1991. - С.60-61.

14. Магнитные свойства лент из аморфного сплава на основе кобальта АМАГ 176 в зависимости от толщины, длины и термообработки / В.С. Чернов, О.Г. Иванов, Б.Л. Штангеев, О.А. Левина // Аморфные прецизионные сплавы: технология, свойства, применение: Тезисы докладов V Всесоюзной конференции. - Ростов Великий, 1991. - С.71.

15. Чернов В.С., Иванов О.Г., Евтеев А.С. Особенности получения и свойства мерных лент из аморфных магнитомягких сплавов // Аморфные прецизионные сплавы: технология, свойства, применение: Тезисы докладов VI Международного совещания. - Боровичи, 1996. - С.42.

16. Чернов В.С., Иванов О.Г. Свойства лент из аморфного магнитомягкого сплава на основе кобальта АМАГ 171 // Аморфные прецизионные сплавы: технология, свойства, применение: Тезисы докладов VI Международного совещания. - Боровичи, 1996. - С.49.

17. Pat. 0163247 Korea. Amorphous Soft Magnetic Alloy / V.S. Chernov, O.G. Ivanov, A.A. Matyash, P.K. Kim, J.S. Song. - 1998.

18. Чернов В.С., Иванов О.Г., Евтеев А.С. Некоторые вопросы техники и технологии производства лент из аморфных сплавов // Аморфные прецизионные сплавы: технология - свойства - применение: Тезисы докладов VII Всероссийской конференции с международным участием. - М., 2000. - С.10.

19. Свойства и применение аморфных сплавов типа АМАГ / В.С. Чернов, О.Г. Иванов, Н.В. Даньшин, Н.Н. Гусева // Аморфные прецизионные сплавы: технология - свойства - применение: Тезисы докладов VII Всероссийской конференции с международным участием. - М., 2000. - С. 147.

20. Чернов В.С., Иванов О.Г., Евтеев А.С. Основные факторы формирования свойств аморфных магнитомягких сплавов // Аморфные прецизионные сплавы: технология - свойства - применение: Тезисы докладов VII Всероссийской конференции с международным участием. - М., 2000. - С.117.

21. Чернов В.С., Иванов О.Г., Евтеев А.С. Свойства и применение аморфных сплавов // Электроника и информатика - XXI век: Тезисы докладов III Международной научно-технической конференции. - М., 2000. - С.210-211.

Иванов Олег Геннадьевич

Особенности формирования физических свойств и разработка
новых аморфных магнитомягких сплавов на основе кобальта

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 15.01.04 г. Формат бумаги 60x84 1/16.
Бумага типографская №2. Печать офсетная. Усл. печ. л. 1.0.
Уч.-изд. л. 1.0. Тираж 100 экз. Зак. № 35.

Калужский филиал Московского государственного
технического университета им. Н.Э. Баумана.
248600, г. Калуга, ул. Баженова, 4.
Редакционно-издательский отдел КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.

№ - 1 3 3 0

РНБ Русский фонд

2004-4

26674