

На правах рукописи

Саврасов Константин Викторович

АНИЗОТРОПИЯ МАГНИТНОЙ ВОСПРИИМЧИВОСТИ
И ТЕКСТУРА ПЛАСТИЧЕСКИ ДЕФОРМИРОВАННЫХ СПЛА-
ВОВ НА ОСНОВЕ ТИТАНА И ЦИРКОНИЯ

01.04.07 -Физика конденсированного состояния

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико–математических наук

Нижний Новгород-2008

Работа выполнена на кафедре общей физики Мордовского государственного университета им. Н.П.Огарева.

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук
доцент Ницев Константин Николаевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Дроздов Юрий Николаевич
кандидат физико-математических наук
Трошин Владимир Николаевич

Ведущая организация: Уральский государственный университет
им. А.М.Горького

Защита состоится «25» июня в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.166.01 при ГОУ ВПО «Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» по адресу: 603950, Нижний Новгород, пр.Гагарина,23.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Нижегородского государственного университета.

Автореферат разослан «24» мая 2008г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



А.И. Машин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

Актуальность работы.

Получение металлов и сплавов с заданными свойствами является актуальной и практически значимой задачей физического материаловедения. Ключевой стадией процесса получения металлических полуфабрикатов в виде прутков и листовых заготовок, используемых для производства изделий, является пластическая деформация. Многочисленными исследованиями установлено, что пластическая деформация может приводить к значительным изменениям физико-механических свойств обрабатываемого материала, причем характер этих изменений существенно зависит от вида и условий деформации. Всесторонне изучено влияние пластической деформации металлов и сплавов на их механические свойства. Достаточно подробно исследовались магнитные свойства пластически деформированных сильномагнитных материалов. Вместе с тем практически неизученным остается отмеченный многими исследователями [1, 2] эффект изменения магнитных свойств диа- и парамагнитных материалов в результате их механической обработки.

Как известно, магнитные свойства диа- и парамагнитных металлов и сплавов не являются их эксплуатационными свойствами. Однако, исследование этих свойств представляет значительный практический интерес, поскольку магнитные свойства определяются свойствами электронной подсистемы материала, его дефектной структурой и составом. В частности, исследование изменений магнитных свойств при пластической деформации позволяет получать ценную информацию о механизмах пластической деформации слабомагнитных металлов и сплавов.

С этой точки зрения весьма актуальны исследования магнитных свойств слабомагнитных поликристаллических металлов и сплавов с ГПУ-структурой, пластическая деформация которых сопровождается формированием кристаллографической текстуры. К числу таких материалов относятся сплавы на основе титана и циркония.

Ранее в работах Р.А. Адамеску, Е.А. Митюшова, Н.Д. Реймер [3-5] исследовалась анизотропия магнитной восприимчивости и электрического сопротивления пластически деформированных титановых сплавов и циркония. На основании этих исследований авторами был сделан вывод о том, что определяющим фактором в эффекте возникновения анизотропии магнитных и электрических свойств данных материалов является текстура. Однако в этих работах магнитная восприимчивость и электрическое сопротивление измерялись лишь в трех главных направлениях в образце, определяемых конкретным видом пластической деформации. На наш взгляд, этого объема измерений недостаточно для общего вывода о существовании однозначной связи между текстурой и анизотропией магнитных и электрических свойств сплавов. Такой вывод может быть сделан лишь на основе анализа полных угловых зависимостей магнитной восприимчивости и электрического сопротивления.

В связи с этим **целью работы** являлось исследование влияния текстуры на

анизотропию магнитной восприимчивости пластически деформированных титановых и циркониевых сплавов, определяемую из угловых зависимостей магнитной восприимчивости исследуемых образцов в заданных плоскостях.

Для достижения этой цели диссертантом решались следующие **задачи**:

1. Создание прецизионной установки для исследования анизотропии магнитной восприимчивости парамагнитных сплавов с возможностью получения полной угловой зависимости магнитной восприимчивости в любой заданной плоскости образца.
2. Комплексное исследование кристаллографической текстуры и анизотропии магнитной восприимчивости сплавов на основе Ti и Zr различного состава, подвергнутых пластической деформации прессованием и прокаткой.
3. Изучение влияния всестороннего сжатия на кристаллографическую текстуру титановых сплавов и анизотропию магнитной восприимчивости.
4. Разработка методики расчета угловой зависимости магнитной восприимчивости в трехмерном пространстве по результатам неполных плоскостных измерений магнитной восприимчивости.
5. Разработка методики расчета анизотропии механических свойств сплавов с ГПУ–структурой по данным измерения анизотропии их магнитной восприимчивости.

Научная новизна:

- Созданы новые установки для измерения магнитной восприимчивости парамагнитных сплавов и анизотропии магнитной восприимчивости с чувствительностью $2 \cdot 10^{-9} \text{см}^3/\text{г}$ и $1 \cdot 10^{-8} \text{см}^3/\text{г}$ соответственно. Преимуществом установки для измерения анизотропии магнитной восприимчивости является возможность получения полной угловой зависимости магнитной восприимчивости в любой заданной плоскости образца.
- Проведены детальные сравнительные исследования анизотропии магнитной восприимчивости и текстуры титанового сплава ВТ6С, подвергнутого аксиально-симметричному прессованию. Установлена однозначная корреляция между анизотропией магнитной восприимчивости и текстурой данного сплава при температуре прессования, соответствующей области существования β -фазы (1030°C) и при степенях деформации, превышающих 50%.
- Проведены детальные сравнительные исследования анизотропии магнитной восприимчивости и текстуры сплавов на основе титана и циркония, подвергнутых пластической деформации прокаткой. Установлено, что при холодной прокатке характер анизотропии магнитной восприимчивости сплавов однозначно определяется типом формирующейся кристаллографической текстуры.
- Проведены исследования анизотропии магнитной восприимчивости и текстуры сплавов систем Ti-Al-V и Ti-Al-V-Mo, подвергнутых пластической деформации путем всестороннего сжатия. Установлено, что при всестороннем сжатии характер анизотропии магнитной восприимчивости и тип текстуры определяются составом сплава.
- Разработана и апробирована новая методика расчета анизотропии модуля Юнга титановых сплавов по данным измерения анизотропии их магнитной вос-

примчивости.

Практическая ценность работы:

1. Созданные в процессе диссертационного исследования новые прецизионные установки для исследования магнитных свойств парамагнитных сплавов позволяют расширить круг исследуемых металлов и сплавов, более подробно исследовать влияние легирующих добавок, пластической деформации на магнитные свойства сплава.
2. Данные об однозначной связи анизотропии магнитной восприимчивости парамагнитных сплавов с их текстурой позволяют прогнозировать возникающую в обрабатываемом материале текстуру, учитывать ее при разработке новых технологий обработки сплавов.
3. Разработанная методика расчета анизотропии упругих свойств по данным магнитных измерений может быть использована для прогнозирования механических характеристик материалов и сплавов с ГПУ-структурой в условиях промышленного производства.

Основные результаты и положения, выносимые на защиту:

1. Защищаемые методики.

- 1.1. Методики измерения магнитной восприимчивости и анизотропии магнитной восприимчивости парамагнитных сплавов, отличающиеся высокой чувствительностью и возможностью исследования полной угловой зависимости магнитной восприимчивости в любой заданной плоскости образца.
- 1.2. Методика расчета анизотропии модуля Юнга титановых сплавов по результатам измерения анизотропии их магнитной восприимчивости.

2. Защищаемые положения.

- 2.1. При аксиальном термомеханическом прессовании титанового сплава ВТ6С при температурах в области существования β -фазы сплава и степенях деформации, превышающих 50%, имеет место однозначная корреляция между анизотропией магнитной восприимчивости сплава и характером его кристаллографической текстуры.
- 2.2. При холодной прокатке титановых сплавов, содержащих алюминий (0,36% Al-Ti, 0,53% Al-Ti, 0,4% Al-Ti, 3,53% Al-Ti), тип их кристаллографической текстуры и характер анизотропии магнитной восприимчивости определяются степенью деформации и концентрацией алюминия в сплаве.
- 2.3. Анизотропия магнитной восприимчивости промышленных титановых сплавов (ВТ6С, ПТ-3В, ПТ-3Вкт, ВТ20), подвергнутых пластической деформации прокаткой, определяется характером кристаллографической текстуры, сформированной в процессе деформации.
- 2.4. Пластическая деформация титановых сплавов ПТ-3Вкт, ВТ20, ВТ14 в условиях всестороннего сжатия приводит к изменениям кристаллографической текстуры и анизотропии магнитной восприимчивости сплавов, причем характер этих изменений зависит от состава сплава.

Апробация работы. Основные результаты работы доложены и обсуждены

на следующих научных конференциях:

1. III Всероссийская научно-техническая конференция " Методы и средства измерений физических величин" (Нижний Новгород, 1998г).
2. I Всероссийская научно-практическая конференция "Прикладные вопросы современной физики" (Саранск, 1999г).
3. XXX Огаревские чтения (Саранск, 2001г).
4. Межрегиональная научная школа для студентов и аспирантов "Материалы нано-, микро- и оптоэлектроники: физические свойства и применение" (Саранск, 2005г).
5. III Всероссийская научно-практическая конференция "Физические свойства металлов и сплавов" (Екатеринбург, 2005г).
6. XXIV Научные чтения имени академика Н.В.Белова (Нижний Новгород, 2005 г).

Публикации. По материалам диссертации имеется 11 публикаций, в том числе 4 статьи, 6 докладов на научных и научно-технических конференциях, получено 1 авторское свидетельство на изобретение. В цитируемых журналах, входящих в перечень ВАК, опубликовано 3 статьи.

Личный вклад автора заключается в проведении экспериментов, обработке экспериментальных данных, интерпретации результатов и формулировке выводов.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов, списка используемой литературы из 100 наименований, содержит 14 таблиц, 52 рисунка. Общий объем диссертации составляет 132 стр.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность выбранной темы исследования, сформулированы цели и задачи исследования, перечислены основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава является обзорной. В первом параграфе содержится обзор публикаций, посвященных исследованию влияния механической обработки на магнитные свойства диа- и парамагнитных материалов. Во втором параграфе рассматриваются различные способы описания кристаллографической текстуры, механизмы ее формирования при пластической деформации, влияние кристаллографической текстуры на анизотропию физических свойств поликристаллических материалов. В третьем параграфе приводится обзор работ, в которых исследовалась связь анизотропии физических свойств поликристаллических материалов с характером анизотропии этих свойств в соответствующих монокристаллах. В четвертом параграфе анализируются публикации, посвященные расчету анизотропии физических свойств по данным текстурных измерений. В заключении главы отмечается, что, несмотря на значительное число работ, посвященных исследованию влияния механической обработки на физические свойства материала-

лов, природа наведенной механической обработкой анизотропии магнитных свойств слабомагнитных поликристаллических материалов остается до конца невыясненной. Обосновывается необходимость проведения детальных исследований анизотропии магнитной восприимчивости и текстуры пластически деформированных слабомагнитных материалов.

Во **второй главе** “Методика эксперимента” описаны материалы, методика приготовления образцов и экспериментальные методы исследования.

В качестве исследуемых материалов использовались: технический титан марки ВТ1-0, модельные сплавы на основе титана (0,6%Al-Ti, 3,6% Al-Ti, 2% Sn-Ti), промышленные титановые сплавы (ПТЗВкт, ПТЗВ, ВТ6С, ВТ20), технический цирконий и сплав 2,5% Nb-Zr. Образцы для исследования вырезались из прутков и листовых заготовок указанных материалов. Прессование прутков сплава ВТ6С осуществлялось при температурах 850°C и 1030°C с различными степенями деформации. Листы исследуемых сплавов получались методом холодной прокатки. Для исключения внешнего загрязнения образцы вырезались из внутренней части листовых заготовок или прутков. Перед измерениями приповерхностный слой образцов удалялся шлифовкой с последующим химическим травлением.

Изучение кристаллографической текстуры материалов проводилось методом анализа прямых (ППФ) и обратных (ОПФ) полюсных фигур. Съемка рентгенограмм проводилась на дифрактометре ДРОН-0,5 с помощью гониометрической приставки ГП-2 в отфильтрованном Cu-K_α излучении. Построение ППФ проводилось по результатам дифрактометрических съемок "на отражение" по методу Шульца, построение ОПФ проводилось по методу Морриса. Для измерения магнитной восприимчивости исследуемых материалов модернизированной методом Торпа-Сенфтла [8] была создана новая прецизионная установка, позволяющая с чувствительностью $0.02 \cdot 10^{-7} \text{ см}^3/\text{г}$ исследовать зависимость магнитной восприимчивости от напряженности магнитного поля и температуры. Для измерения анизотропии магнитной восприимчивости образцов была создана установка, позволяющая с чувствительностью $0.01 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{г}$ измерять магнитную восприимчивость в любом направлении в заданной плоскости образца. Измерение магнитной восприимчивости при этом осуществляется методом Фарадея с регистрацией силы, действующей на образец в неоднородном магнитном поле, с помощью микровесов.

В **третьей главе** представлены результаты экспериментальных исследований анизотропии магнитных свойств и кристаллографической текстуры сплавов на основе титана и циркония, подвергнутых пластической деформации путем: аксиально-симметричного прессования, холодной прокатки, и всестороннего сжатия.

В **первом параграфе третьей главы** представлены результаты исследования текстуры и магнитных свойств образцов, вырезанных из прутков титановых сплавов, полученных термомеханическим аксиально-симметричным прессованием. Исследования проводились на образцах сплава ВТ6С, полученных прессованием при температурах в области существования α -фазы (850°C) и β -фазы (1030°C).

При этом обнаружено, что характер анизотропии магнитной восприимчивости, возникающей в процессе пластической деформации, зависит от температуры термомеханической обработки. В случае прутков, прессованных при температуре в области существования α -фазы, анизотропия магнитной восприимчивости мала и не изменяется при увеличении степени деформации материала. У прутков, прессованных при 1030°C (в области существования β -фазы сплава), при степенях деформации превышающих 50%, отчетливо наблюдается анизотропия магнитной восприимчивости (рис.1). Этот эффект однозначно коррелирует с характером формирующейся в процессе деформации образцов кристаллографической текстуры¹. Как следует из результатов текстурных измерений (рис.2), по мере увеличения степени деформации в образцах наблюдается активное формирование преимущественных ориентировок зерен. В случае прутка, прессованного при температуре 850°C, основной компонентой текстуры является компонента $\langle 10\bar{1}0 \rangle$, для прутка, прессованного при температуре 1030°C, основной является компонента $\langle 0001 \rangle$.

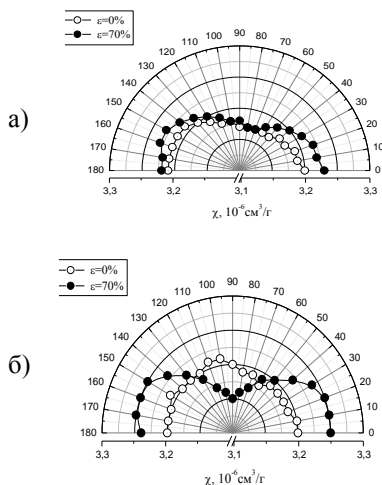


Рис.1. Угловая зависимость магнитной восприимчивости сплава ВТ6С в плоскости, параллельной оси прутка. Температура прессования: 850°C(а), 1030°C(б). (0°-180°– осевое направление прутка). Погрешность измерений $\pm 0,01 * 10^{-6} \text{ см}^3/\text{г}$.

Появление преимущественной ориентировки $\langle 10\bar{1}0 \rangle$ может быть но пластической деформацией зерен α -фазы скольжением по системам $\{10\bar{1}0\} \langle 11\bar{2}0 \rangle$, $\langle 0001 \rangle \langle 11\bar{2}0 \rangle$ и $\{10\bar{1}1\} \langle 11\bar{2}0 \rangle$. Появление ровки $\langle 0001 \rangle$ в прутках в области существования β -фазы связывается нами с процессом лизации при охлаждении сплава.

Сравнение результатов текстурных и магнитных измерений показывает, что кристаллографическая текстура является определяющей причиной возникновения анизотропии магнитной восприимчивости пластически деформированного сплава ВТ6С.

Из сравнения следует, что весовой вклад ориентировок разных типов в анизотропию магнитной восприимчивости существенно различен. Так ориентировка $\langle 11\bar{2}0 \rangle$, несмотря на свою значительную интенсивность, не влияет заметно на

¹ Автор выражает благодарность С.В. Гребенкину за помощь в проведении текстурных измерений и интерпретации их результатов

угловую зависимость магнитной восприимчивости, что можно видеть меньшим значением магнитной восприимчивости монокристалла соответствующего сплава вдоль данного направления. Напротив, тировка (0001) весьма сильно влияет на характер угловой зависимости магнитной восприимчивости.

В плоскости, перпендикулярной оси прутка, как для прутков, прессованных при температуре 850°C, так и для прутков, прессованных при температуре 1030°C, анизотропии магнитной восприимчивости не наблюдалось, что, является следствием осевой симметрии деформации.

Во втором параграфе главы 3 исследуется влияние типа и содержания легирующих добавок на магнитные свойства и текстуру пластически деформированных листовых образцов сплавов системы Ti-Al и Ti-Sn.

На рис.3. представлены графики зависимости параметра анизотропии магнитной восприимчивости, $\Delta\chi$, исследуемых сплавов системы Ti-Al от степени деформации для плоскостей НН-НП, НН-ПН и НП-ПН (где НН – направление нормали к плоскости листа, НП- направление прокатки листа, ПН- направление перпендикулярное прокатке). Из полученных результатов следует, что с ростом степени деформации анизотропия магнитной восприимчивости в плоскости НН-НП увеличивается при концентрациях алюминия в сплаве до 1,04%. В плоскости НП-ПН, характер зависимости параметра анизотропии магнитной восприимчивости от степени деформации определяется концентрацией алюминия в сплаве. При содержании алюминия 0,36% анизотропия магнитной восприимчивости уменьшается с ростом степени деформации. Напротив, при концентрации алюминия 3,53% параметр $\Delta\chi$ с ростом степени деформации увеличивается. Подобный эффект наблюдается и на угловой зависимости удельного электрического сопротивления в плоскости НП-ПН.

В третьем параграфе главы 3 представлены результаты исследования анизотропии магнитной восприимчивости и текстуры пластически деформиро-

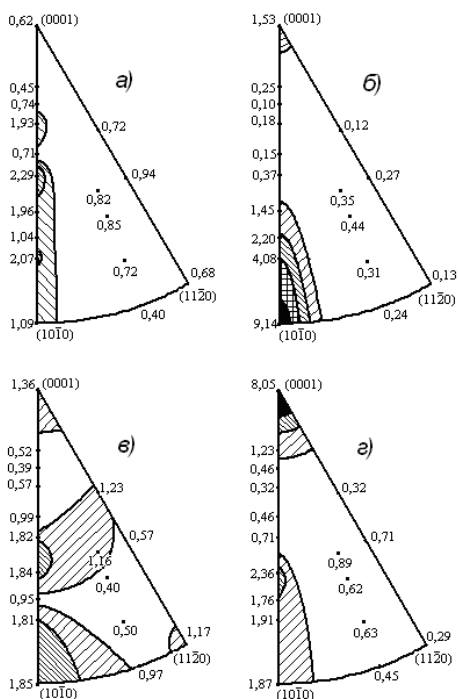


Рис.2. Обратные полюсные фигуры сплава ВТ6С, прессованного при 850°C (а, б) и 1030°C (в, г). Съемка в осевом направлении прутка. Степень деформации 0%(а, в), 70%(б, г).

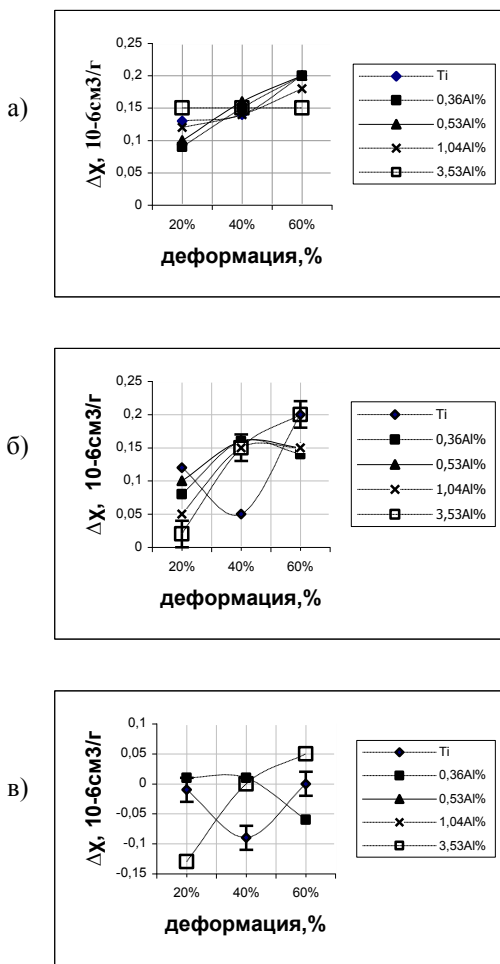


Рис.3. Зависимость параметра анизотропии магнитной восприимчивости от степени деформации. (а $-\Delta\chi = \chi_{\text{НН}} - \chi_{\text{НП}}$, б $-\Delta\chi = \chi_{\text{НН}} - \chi_{\text{ПН}}$, в $-\Delta\chi = \chi_{\text{НП}} - \chi_{\text{ПН}}$). Погрешность измерений $\pm 0,02 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{г}$.

ду возрастанием анизотропии магнитной восприимчивости и перестройкой текстуры при деформации со степенью 40%, приводящей к распаду текстурного максимума на ППФ наклоненного под углом 20° в сторону ПН относительно направления нормали к плоскости листа и росту полюсной плотности на ОПФ в

ванных сплавов систем Ti-Al-V и Ti-Al-V-Mo: ВТ6С, ПТ-3В, ПТ-3Вкт, ВТ20.

Для всех сплавов нами блюдалась отчетливая связь между характером тропии магнитной востности и текстурой. Нами новлено, что характер угловой зависимости магнитной восприимчивости существенно зависит от выбора плоскости, в которой проводились измерения, и степени деформации материала.

На рис.4 представлены результаты измерения анизотропии магнитной восприимчивости образцов сплава ВТ6С, подвергнутого деформации прокаткой. Из рисунка видно, что образцы данного сплава обладают заметной анизотропией магнитной восприимчивости как в плоскости НН-НП, так и в плоскости НН-ПН.

Интересным является эффект резкого возрастания анизотропии магнитной восприимчивости в плоскости НН-ПН для образцов данного сплава деформированных со степенью деформации 40%. Исследование текстуры этого сплава показывает, что при любых степенях деформации текстура листа сохраняется существенно многокомпонентной. Это приводит к тому, что анизотропия магнитной восприимчивости слабо изменяется в обеих плоскостях. При этом наблюдается отчетливая связь между

направлении $\langle 0001 \rangle$.

Предполагается, что такая пере-стройка текстуры, обусловлена одно-временным присутствием в сплаве двух легирующих добавок - Al и V. Одна из них (Al) усиливает базисное скольжение и должна приводить при увеличении степени деформации к текстуре типа $(0001)[10\bar{1}0]$, другая добавка (V) – усиливает призматическое скольжение и увеличивает угол наклона текстурных максимумов на ППФ относительно НН. Это должно приводить в первом случае, к увеличению анизотропии магнитной восприимчивости, во втором к уменьшению значения магнитной восприимчивости в плоскости НП-ПН. Таким образом, до деформации 40% преобладает влияние алюминия, приводящее к росту анизотропии магнитной восприимчивости.

В четвертом параграфе приведены результаты исследования влияния пластической деформации на текстуру и магнитные свойства циркония и сплава $2,5\%Nb-Zr$. Полученные данные подтверждают гипотезу об определяющей роли текстуры в эффекте возникновения анизотропии магнитной восприимчивости исследуемых сплавов при пластической деформации.

В пятом параграфе приводятся результаты исследования влияния деформации всесторонним сжатием на анизотропию магнитной восприимчивости и текстуру промышленных сплавов системы Ti-Al-V и Ti-Al-V-Mo: ПТ-3Вкт и Вт14. Исследуемые сплавы подвергались воздействию всестороннего гидростатического сжатия с давлением $P=9 \pm 0,5$ кбар.

Результаты исследования угловых зависимостей магнитной восприимчивости сплавов в плоскостях НН-НП и НН-ПН до и после всестороннего сжатия представлены на рис.5.

Видно что, несмотря на равнозначность деформации по направлениям, всестороннее сжатие может существенно изменить характер анизотропии магнитной восприимчивости сплавов, причем этот эффект различным образом проявляется на сплавах различного состава. Из рис.5 следует что, всестороннее сжатие образца сплава ПТ3-Вкт при $P=9$ Кбар приводило к существенному уменьшению разности $\chi_{nn} - \chi_{np}$ и $\chi_{nn} - \chi_{pp}$.

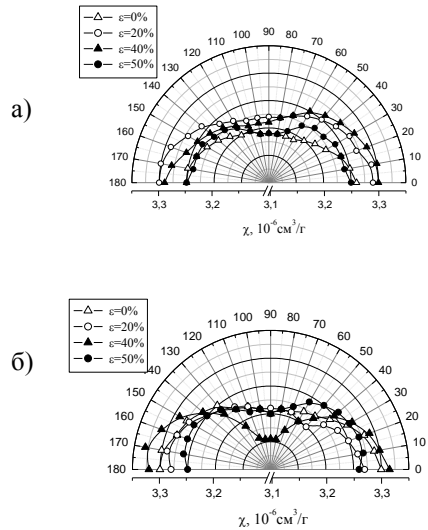


Рис.4. Угловая зависимость магнитной восприимчивости образцов сплава ВТ6С в плоскости НН-НП(а) и НН-ПН (б). ($0^\circ-180^\circ$ – направление нормали). Погрешность измерений $\pm 0,01 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{г}$.

В тоже время аналогичная деформация образцов сплава ВТ20 не приводила к изменениям магнитной восприимчивости. Этому соответствует малая перестройка текстуры данного сплава, наведенная всесторонним сжатием. Отчетливые изменения угловой зависимости магнитной восприимчивости наблюдались нами при исследовании сплава ВТ14 подвергнутого всестороннему сжатию.

Из анализа ОПФ образцов указанных сплавов в исходном состоянии и после их всестороннего сжатия (рис.6) следует, что данная обработка сплавов в одинаковых условиях приводит к формированию различных по характеру текстур.

Так для сплава ПТ-3Вкт в исходном состоянии наблюдается текстурный максимум в направлении $\langle 0001 \rangle$. После всестороннего сжатия, происходит уменьшение (более чем в два раза) интенсивности максимума $\langle 0001 \rangle$. В случае сплава ВТ20 изменения положений текстурных максимумов на ОПФ не происходит.

Сплав ВТ14 в исходном состоянии имеет сильный максимум в направлении $\langle 11\bar{2}0 \rangle$, а также небольшие максимумы полюсной плотности в направлениях $\langle 10\bar{1}4 \rangle$ - $\langle 11\bar{2}4 \rangle$. После всестороннего сжатия образца сплава ВТ14 вид ОПФ меняется коренным образом. Максимум в направлении $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ исчезает, полюсная плотность в поясе $(10\bar{1}4)$ - $(11\bar{2}4)$ повышается, возникает слабый максимум в направлении $\langle 0001 \rangle$.

Этому соответствуют значительные изменения угловых зависимостей магнитной восприимчивости сплава ВТ14. В исходном состоянии зависимость магнитной восприимчивости сплава от направления практически не наблюдалась как

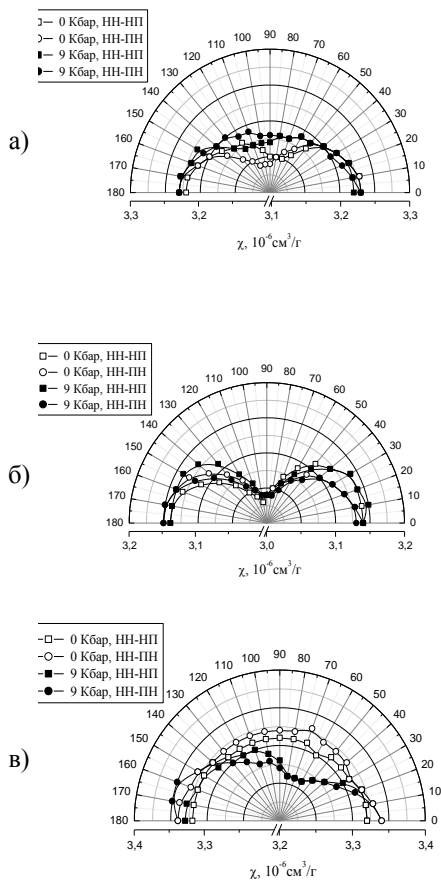


Рис.5. Угловая зависимость магнитной восприимчивости сплава ПТ3Вкт(а), ВТ20(б) и ВТ14(в) в плоскости НН-НП и НН-ПН до и после всестороннего сжатия. ($0^\circ - 180^\circ$ – направление нормали листа). Погрешность измерений $\pm 0,01 * 10^{-6} \text{ см}^3/\text{г}$.

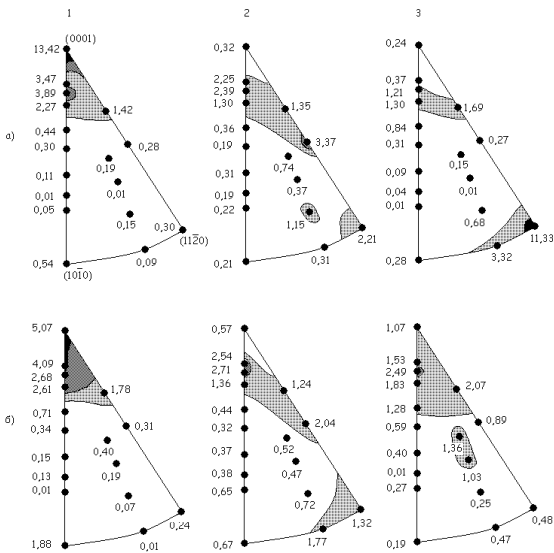


Рис.6. Обратные полюсные фигуры для направления нормали листов титановых сплавов подвергнутого всестороннему сжатию: а- исходное состояние, б- после обработки всесторонним сжатием $P=9\text{кбар}$. 1 - сплав ПТ-3Вкт, 2 - сплав ВТ20, 3 - сплав ВТ14.

магнитной восприимчивости с максимумом в направлении НН.

В четвертой главе диссертации описана разработанная автором методика расчета анизотропии механических свойств по результатам магнитных измерений. Возможность расчета анизотропии физических свойств текстурированного поликристаллического материала по данным текстурных измерений показана в [3, 4].

В лабораторной системе координат (рис. 7) значение обратной величины модуля Юнга в заданном направлении описывается выражением:

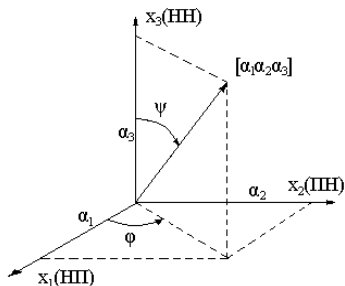


Рис.7. Задание выбранного направления в лабораторной системе координат.

в плоскости НН-НП, так и в плоскости НН-ПН. Деформация сплава всесторонним сжатием, приводила к возникновению магнитной анизотропии, одинаковой для плоскостей НН-НП и НН-ПН. Постоянство значений магнитной восприимчивости сплава в исходном состоянии для всех направлений можно объяснить отсутствием в материале кристаллитов, базисные плоскости которых ориентированы в плоскости листа.

Текстурный максимум в направлении $\langle 11\bar{2}0 \rangle$, как было показано ранее на примере прутков, практически не влияет на магнитную восприимчивость в выбранном направлении. Всестороннее сжатие приводит к увеличению полюсной плотности в направлениях близких к $\langle 0001 \rangle$, что, в свою очередь, приводит к возникновению анизотропии

$$E^{-1}(\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3) = S_{11} \alpha_1^4 + S_{22} \alpha_2^4 + S_{33} \alpha_3^4 + (S_{44} + 2S_{23}) \alpha_2^2 \alpha_3^2 + (S_{55} + 2S_{13}) \alpha_1^3 \alpha_3^2 + (S_{66} + 2S_{12}) \alpha_1^2 \alpha_2^2, \quad (1)$$

где $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – направляющие косинусы заданного направления в образце, S_{ij} – коэффициенты податливости текстурированного поликристалла.

Выразим их через коэффициенты податливости монокристалла соответствующего сплава и параметры кристаллографической текстуры поликристаллического материала:

$$S_{11} = s_{11} - (2s_1 + s_2) \Delta_1 + s_3 \Delta_3 \quad (2)$$

$$S_{22} = s_{11} - (2s_1 + s_2) \Delta_2 + s_3 \Delta_4 \quad (3)$$

$$S_{12} = s_{13} - (s_1 - s_3)(1 - \Delta_1 - \Delta_2) + \frac{1}{2} s_3 (1 + \Delta_5 - \Delta_3 - \Delta_4) \quad (4)$$

$$S_{66} = s_{44} + (s_2 - 4s_3)(1 - \Delta_1 - \Delta_2) + 2s_3 (1 + \Delta_5 - \Delta_3 - \Delta_4) \quad (5)$$

где s_{ij} и s_i – коэффициенты равные или выражаемые через коэффициенты податливости соответствующего монокристалла. ($s_1 = S_{12} - S_{13}$, $s_2 = S_{66} - S_{44}$, $s_3 = S_{11} + S_{33} - S_{44} - 2S_{13}$, $s_{11} - s_{12} = 1/2 S_{66}$), Δ_i – параметры текстуры.

В случае исследования угловой зависимости модуля упругости от направления вырезки образца в лабораторной системе координат для плоскости $O_{x_1 x_2}$ (НП-ПН) значения направляющих косинусов равны: $\alpha_3 = 0$, $\alpha_1 = \cos \varphi$, $\alpha_2 = \sin \varphi$. Тогда зависимость модуля Юнга от направления в плоскости НП-ПН описывается соотношением:

$$E^{-1}(\varphi) = s_{11} - \frac{2s_1 + s_2}{2} (\Delta_1 + \Delta_2) + \frac{3s_3}{8} (2\Delta_1 + 2\Delta_2 + \Delta_5 - 1) + \frac{1}{2} [s_3 (\Delta_3 - \Delta_4) - (2s_1 + s_2) (\Delta_1 - \Delta_2)] \cos 2\varphi + \frac{s_3}{8} (4\Delta_4 + 4\Delta_3 - 3\Delta_5 - 6\Delta_1 - 6\Delta_2 + 3) \cos 4\varphi, \quad (6)$$

где φ – угол между осью O_{x_1} и направлением вырезки образца.

Магнитная восприимчивость поликристаллического материала с текстурой орторомбической симметрии определяется тремя главными значениями магнитной восприимчивости [3]:

$$\chi_i^* = (\chi_3 - \chi_1) \Delta_i + \chi_1, \quad (7)$$

где χ_1, χ_3 – магнитная восприимчивость, измеренная вдоль базисной и гексагональной оси монокристалла данного сплава, χ_i^* – значения магнитной восприимчивости поликристаллического материала в направлении НП, ПН, НН. Отсюда можно рассчитать текстурные параметры поликристаллического материала:

$$\Delta_i = \frac{\chi_i^* - \chi_1}{\chi_3 - \chi_1}, \quad (8)$$

Магнитная восприимчивость в выбранном направлении поликристаллического

го образца с текстурой орторомбической симметрии определяется выражением:

$$\chi(\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3) = \chi_{\text{НП}} \alpha_1^2 + \chi_{\text{ПН}} \alpha_2^2 + \chi_{\text{НН}} \alpha_3^2 \quad (9)$$

или для плоскости $O_{x_1x_2}$ (НП-ПН):

$$\chi(\varphi_3) = \chi^* \cos^2 \varphi + \chi^* \sin^2 \varphi = \frac{\chi_1^* + \chi_2^*}{2} + \frac{\chi_1^* - \chi_2^*}{2} \cos 2\varphi, \quad (9)$$

Магнитная восприимчивость в заданном направлении в плоскости $O_{x_1x_2}$ при этом будет равна:

$$\chi^*(\varphi) = \chi_1 + \frac{\chi_3 - \chi_1}{2} (\Delta_2 + \Delta_1) + \frac{\chi_3 - \chi_1}{2} (\Delta_1 - \Delta_2) \cos 2\varphi \quad (10)$$

Сравнение выражений (6) и (10) показывает, что анизотропия магнитных и упругих свойств описывается, в общем, различными ориентационными соотношениями. В первом случае упругие свойства описываются выражением, содержащим компоненты 2-го и 4-го порядка, во втором только 2-го порядка и прямое использование результатов измерения одних свойств для прогнозирования других невозможно.

Тем не менее, особенности анизотропии упругих свойств некоторых монокристаллов с ГПУ решеткой таковы, что слагаемые в выражении для модуля Юнга, содержащие неопределяемые из магнитных измерений текстурные параметры, не влияют существенным образом на его анизотропию и на фоне погрешности измерений модуля Юнга ими можно пренебречь. На практике это справедливо для металлов с малым значением параметра s_3 , относительно других коэффициентов. Для такого типа материалов допустимо применение следующего выражения для расчета угловой зависимости модуля Юнга:

$$\begin{aligned} \bar{E}^{-1}(\varphi) = s_{11} + \frac{2s_1 + s_2}{2} \left(\frac{\chi_1^* + \chi_2^* - 2\chi_1}{\chi_3 - \chi_1} \right) \\ + \frac{1}{2} (2s_1 + s_2) \left(\frac{\chi_1^* - \chi_2^*}{\chi_3 - \chi_1} \right) \cos 2\varphi, \end{aligned} \quad (11)$$

В качестве примера приводится расчет анизотропии модуля Юнга в плоскости НП-ПН для сплава технического титана ВТ1-0, подвергнутого деформации холодной прокаткой с различной степенью обжатия. В результате эксперимента для сплава ВТ1-0 были получены следующие значения магнитной восприимчивости в направлениях НП (χ_1^*) и ПН (χ_2^*), табл.1.

Таблица 1.

Магнитная восприимчивость, $\cdot 10^6 \text{см}^3/\text{г}$	Деформация		
	20%	40%	60%
χ_1^*	3.17	3.15	3.15
χ_2^*	3.23	3.25	3.17

Подстановка результатов магнитных измерений, значений магнитной восприимчивости и упругих констант для монокристалла титана в формулу (11) дает зависимость $E(\varphi)$ (в ГПа) представленную в таблице 2, (в скобках результаты механических измерений).

Таблица 2.

Угол от НП, °	Модуль Юнга, ГПа		
	$\varepsilon=20\%$	$\varepsilon=40\%$	$\varepsilon=60\%$
0	110,5(107,0)	109	109(104,7)
30	111,5	111	109
60	114	115	110
90	115(119,2)	117	110,5(112,6)

Как видно из таблицы, расчет с использованием данных магнитных измерений дает значения модуля Юнга, характер анизотропии которого находится в хорошем соответствии с результатами прямых измерений.

Таким образом, установлено, что для титана и его сплавов возможно использование результатов исследований анизотропии магнитной восприимчивости для расчета анизотропии модуля Юнга в текстурированном поликристаллическом образце.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Созданы новые установки для измерения магнитной восприимчивости парамагнитных сплавов и анизотропии магнитной восприимчивости с чувствительностью $2 \cdot 10^{-9} \text{см}^3/\text{г}$ и $1 \cdot 10^{-8} \text{см}^3/\text{г}$ соответственно. Преимуществом установки для измерения анизотропии магнитной восприимчивости является возможность получения полной угловой зависимости магнитной восприимчивости в любой заданной плоскости образца.
2. Исследована анизотропия магнитной восприимчивости и кристаллографическая текстура титанового сплава ВТ6С, подвергнутого аксиально-симметричному термомеханическому прессованию. Установлена однозначная корреляция между характером кристаллографической текстуры и анизотропией магнитной восприимчивости сплава ВТ6С при температурах прессования в области существования β -фазы сплава, и степенях деформации превышающих 50%.

3. Исследовано влияние пластической деформации прокаткой на кристаллографическую текстуру, магнитные и электрические свойства материалов системы Ti-Al (титана, сплавов: 0,36% Al-Ti, 0,53% Al-Ti, 1,04% Al-Ti и 3,53% Al-Ti). Установлено, что тип кристаллографической текстуры и характер анизотропии магнитной восприимчивости существенно зависят от степени деформации и концентрации алюминия в сплаве.
4. Исследовано влияние механической деформации прокаткой на текстуру и магнитные свойства промышленных сплавов на основе титана (BT6С, ПТ-3В, ПТ-3Вкт, BT20). Показано, что анизотропия магнитной восприимчивости исследуемых сплавов определяется характером возникающей в результате пластической деформации кристаллографической текстуры.
5. Проведены исследования кристаллографической текстуры и анизотропии магнитной восприимчивости титановых сплавов, подвергнутых деформации всесторонним сжатием. Отмечен эффект возникновения анизотропии магнитной восприимчивости сплавов, связанный с перестройкой текстуры в результате всестороннего сжатия образцов. Показано, что деформация всесторонним сжатием, в зависимости от состава сплава, может приводить к различным изменениям кристаллографической текстуры и анизотропии магнитной восприимчивости.
6. Предложена методика расчета анизотропии модуля Юнга титановых сплавов по результатам измерения анизотропии их магнитной восприимчивости.

Список цитируемой литературы:

1. Страхов Л.П. Влияние механической обработки на магнитные свойства твердых тел. «Вопросы электроники твердого тела» сб. научн. тр. вып.4. Л: изд-во Ленингр. ун-та.- 1974.
2. Страхов Л.П. Влияние механической обработки на магнитные свойства твердых тел. «Вопросы электроники твердого тела» сб. научн. тр. вып.4. Л: изд-во Ленингр. ун-та.- 1978. -С.115-168.
3. Адамеску Р. А., Гельд П. В., Митюшов Е. А. Анизотропия физических свойств металлов. - М.: Металлургия.- 1985. -136С.
4. Митюшов Е. А, Гельд П. В, Адамеску Р. А. Обобщенная проводимость и упругость макронеоднородных гетерогенных материалов.- Москва: Металлургия.-1992.-144С.
5. Реймер Н. Д. Анизотропия физических и механических свойств текстурированных поликристаллов с гексагональной структурой. - дис. на соискание ученой степени канд. физ. - мат. наук. – Свердловск.- 1984.-169С.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

Статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых журналах и изданиях, утвержденных ВАК РФ:

1. Саврасов, К.В. Автоматизированная установка для измерения магнитной восприимчивости диа- и парамагнетиков./ К.Н. Нищев, К.В. Саврасов// Приборы и техника эксперимента».- Москва - 1995.- №5.- С.161-166.
2. Саврасов, К.В. Магнитометрический метод контроля анизотропии механических свойств./ Е.А. Митюшев, С.В. Гребенкин, К.В. Саврасов // Заводская лаборатория.- Москва.- 2002.- №9.- С.45-47.
3. Саврасов, К.В. Текстура и магнитные свойства титановых сплавов, подвергнутых пластической деформации./ К.Н. Нищев, С.В. Гребенкин, К.В. Саврасов // Вестник Нижегородского университета. – Н. Новгород.- 2006.-вып.1(19). -С.218-223.

Публикации в других изданиях:

4. Саврасов, К.В. Автоматизированная установка для измерения магнитной восприимчивости диа- и парамагнетиков./ К.Н. Нищев, К.В. Саврасов, Д.В. Киреев// Всероссийская конференция «Структура и свойства твердых тел» сб. научн. тр.- Н. Новгород.- 1999.- С.162-163.
5. Саврасов, К.В. Установка для измерения анизотропии магнитной восприимчивости диа- и парамагнетиков./ К.Н. Нищев, К.В. Саврасов// III всероссийская научно-техническая конференция «Методы и средства измерений физических величин». сб. научн. тр.- Н. Новгород.- 1998.- С.43.
6. Саврасов, К.В. Автоматизация измерений магнитной восприимчивости диа- и парамагнетиков./ К.Н. Нищев, К.В. Саврасов, Д.В. Киреев// I научно-практическая конференция «Прикладные вопросы современной физики». сб. научн. тр. - Саранск.- 1999.- С.125-126.
7. Саврасов, К.В. Влияние кристаллографической текстуры на анизотропию магнитных свойств прутков титановых сплавов./ К.Н. Нищев, С.В. Гребенкин, К.В. Саврасов // Вестник Мордовского университета.- Саранск.- 2002.- N1-2.- С.112-116.
8. Саврасов, К.В. Влияние пластической деформации на магнитные свойства парамагнитных сплавов./ К.Н. Нищев, К.В. Саврасов // IV межрегиональная молодежная научная школа «Материалы нано-, микро- и оптоэлектроники: физические свойства и применение» сб. научн. тр.- Саранск.- 2005.- С.99.
9. Саврасов, К.В. Магнитные свойства титановых сплавов, подвергнутых пластической деформации./ К.Н. Нищев, С.В. Гребенкин, К.В. Саврасов // III всероссийская научно-практическая конференция «Физические свойства металлов и сплавов». сб. научн. тр.- Екатеринбург.- 2005.- С.

- 117-120.
10. Саврасов, К.В. Текстура и магнитные свойства титановых сплавов, подвергнутых пластической деформации./ К.Н. Нищев, К.В. Саврасов // XXIV Научные чтения имени академика Н.В.Белова. сб. научн. тр.- Нижний Новгород.- 2005.- С.119-121.
 11. Способ определения магнитной восприимчивости диа- и парамагнетиков: авторское свидетельство Рос. Федерации / Саврасов, К.В. Нищев К.Н., Смоланов Н.А., Кудрявцев С.В// №1739271; зарегистрировано в государственном реестре 8.12.92.

Подписано в печать 25.05.08. объем 1,0 п. л.

Тираж 100 экз. Заказ №_____.

Типография Издательства Мордовского университета
430000, г. Саранск, ул. Советская , 24