

На правах рукописи



ИСХАКОВ МАРАТ ЭДУАРДОВИЧ

**СВЯЗЬ ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЯ СПЛАВОВ  
НА ОСНОВЕ МЕДИ И ЦИНКА С ТЕРМИЧЕСКОЙ  
ДЕФОРМАЦИЕЙ**

*Специальность:*

01.04.07 - физика конденсированного состояния

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Махачкала – 2011

Работа выполнена на кафедре физики твердого тела Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Дагестанский государственный университет»

**Научный руководитель:** доктор физико-математических наук,  
профессор Мурлиева Жарият Хаджиевна

**Официальные оппоненты:** доктор физико-математических наук,  
профессор Гельчинский Борис Рафаилович

доктор физико-математических наук,  
Каллаев Сулейман Нурулисламович

**Ведущая организация:**

Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН

Защита состоится 2 июня 2011 года в 16<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 002.095.01 при Институте физики ДНЦ РАН по адресу: 367003, г. Махачкала, пр. Шамиля, 39А

Отзывы на автореферат просьба направлять по адресу:  
367003, г. Махачкала, ул. М. Ярагского, д.94,  
Институт физики ДНЦ РАН, секретарю диссертационного совета

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке  
Института физики ДагНЦ РАН

Автореферат разослан 30 апреля 2011 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета доктор  
физико-математических наук



А.Б. Батдалов

## Общая характеристика работы

**Актуальность работы.** Работа направлена на решение фундаментальной задачи по установлению природы формирования потенциала рассеяния электронов, определяемого ангармонизмом колебаний атомов при тепловых возбуждениях решетки, в рамках проблемы создания феноменологической теории нелинейных неравновесных процессов в конденсированных средах. Установление функциональных связей электросопротивления с термической деформацией решетки атомов в бинарных твердых растворах, электронных соединениях и механических смесях на их основе, представляет существенный вклад в решение указанной проблемы.

Известные теоретические модели рассеяния квазичастиц на тепловых возбуждениях в конденсированных средах не позволяют проводить количественные оценки температурных зависимостей электросопротивлений металлов и сплавов. Более того, пока нельзя предсказать особенности электронной проводимости новых материалов, в том числе наночастиц, а также многофункциональных объектов и компонентов электронной техники, создаваемых на основе современных технологий. В связи с чем, при решении указанных выше проблем актуален поиск новых путей и подходов, явно учитывающих ангармонизм колебаний атомов.

Доступным способом расчета кинетических коэффициентов является метод, основанный на решении кинетических уравнений. Решение линеаризованного кинетического уравнения ищут, исходя из феноменологического уравнения переноса. Оценка времени релаксации рассеяния соответствующих квазичастиц путем решения этого уравнения предполагает знание истинного рассеивающего потенциала. При количественных расчетах кинетических коэффициентов точные значения констант деформационных потенциалов получают из экспериментов, не имеющих отношения к рассеянию электронов на фононах. Такая процедура позволяет учесть нарастание ангармонизма при изменении параметров состояния вещества с температурой. Например, обобщенные значения деформационных потенциалов рассеяния электронов для каждого из равновесных состояний металлов и сплавов можно определить по данным термической деформации.

Развитие теории рассеяния квазичастиц в упорядоченной и неупорядоченной фазах, а так же в сплавах с сильным статическим беспорядком, требует, в свою очередь, решения проблемы установления истинного деформационного потенциала рассеяния электронов в этих фазах. Значительный интерес в рамках этой проблемы представляют экспериментальные исследования электросопротивления и теплового расширения сплавов на одних и тех же образцах, в одних и тех же условиях для установления роли термической деформации при формировании потенциала рассеяния электронов.

**Цель работы.** Исследование связи электросопротивления с термической деформацией в бинарных сплавах на основе меди и цинка, представляющих собой твердые растворы, электронные соединения и их механические смеси, для установления роли нарастания эффекта ангармонизма коле-

баний атомов, в среднем по решетке, при формировании потенциала рассеяния электронов в этих сплавах

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

- *In situ* измерения температурных зависимостей электросопротивления и коэффициента теплового расширения твердых растворов, электронных соединений и их механических смесей на основе меди и цинка в широком интервале температур;
- Установление связи между этими свойствами на основе корреляционного анализа и определение характеристических электросопротивлений для каждой из фаз;
- Выявление факторов, определяющих характеристические электросопротивления для исследованных сплавов, и определение механизмов рассеяния электронов на тепловых возбуждениях в каждой из фаз.

**Научная новизна:**

Проведены *in situ* исследования электросопротивления и теплового расширения твердых растворов Cu-Zn, в том числе претерпевающих упорядочение, и механических смесей на их основе в широком интервале температур, а так же корреляционный анализ связи электросопротивления с термической деформацией решетки.

Показано, что в гамма фазе, в отличие от бета фазы, температурные зависимости производных сопротивления и абсолютной деформации по температуре насыщаются в упорядоченной и неупорядоченной фазах. Температурные зависимости электросопротивления и теплового расширения механических смесей:  $\alpha+\beta$ ,  $\beta+\gamma$  и  $\gamma+\epsilon$  наследуют аномалии свойств электронных соединений, связанные с переходом соответствующих фаз в упорядоченное состояние и в состояние со статическим беспорядком.

Установлено, что зависящий от температуры вклад в общее электросопротивление в каждой из фаз, линейно связан с произведением коэффициента теплового расширения на температуру. Угловым коэффициентом в этих зависимостях представляет собой характеристическое электросопротивление для каждой фазы. Концентрационная зависимость характеристического электросопротивления сплавов близка к аддитивной кроме  $\beta$ -упорядоченной фазы,  $\gamma$ - и  $\epsilon$ - латуней. Аномально низкое значение характеристического электросопротивления для  $\beta$ -упорядоченной фазы связано с возрастанием периодичности потенциала решетки. Относительно высокие значения для  $\gamma$ - и  $\epsilon$ - фаз связаны с тем, что потенциал рассеяния в этих фазах зависит не только от увеличения межатомного расстояния, но и от возрастания статического беспорядка.

**На защиту выносятся:**

1. Структурные особенности, а так же явления упорядочения и статического беспорядка соответствующих фаз электронных соединений на основе меди и цинка, приводят к существенному различию абсолютных значений и характера температурных зависимостей электросопротивле-

ния и теплового расширения. Температурные зависимости электросопротивления и теплового расширения механических смесей:  $\alpha+\beta$ ,  $\beta+\gamma$  и  $\gamma+\varepsilon$  наследуют аномалии свойств электронных соединений, связанные с переходом соответствующих фаз в упорядоченное состояние и в состояние со статическим беспорядком.

2. В гамма фазе, в отличие от бета фазы, температурные зависимости производных сопротивления и абсолютной деформации по температуре насыщаются в упорядоченной и неупорядоченной фазах.
3. Зависящий от температуры вклад в общее электросопротивление в каждой из фаз линейно связан с произведением коэффициента теплового расширения на температуру.
4. Концентрационная зависимость характеристического электросопротивления сплавов близка к аддитивной кроме  $\beta$ -упорядоченной фазы,  $\gamma$ - и  $\varepsilon$ - латуней. Отклонение от аддитивной зависимости связано с возрастанием статического порядка для  $\beta$ -латуни и беспорядка для  $\gamma$ - и  $\varepsilon$ -латуней.

**Практическая ценность работы.** Метод эмпирической оценки кинетического коэффициента в уравнении переноса заряда по данным термической деформации при различных температурах позволяет установить значения характеристических электросопротивлений веществ в различных фазовых состояниях. Способ оценки значений характеристического электросопротивления открывает перспективу получения объективных данных по температурным зависимостям электросопротивления проводников субмикронных размеров в различных фазах по результатам исследования коэффициента теплового расширения, например, рентгеновским методом.

Возможность получения этих данных существенно повысит эффективность численных методов эксперимента по определению свойств таких объектов, а также методов прогнозирования значений электросопротивления при создании соответствующих материалов и компонентов электронной техники.

Полученные в работе результаты указывают на определяющую роль термической деформации при формировании потенциала рассеяния электронов на элементарных тепловых возбуждениях в сплавах. В связи с чем, они будут востребованы при развитии теории рассеяния квазичастиц в проводниках, основанной на более реалистичной модели формирования сечения рассеяния электронов, чем модель, учитывающая лишь возрастание амплитуды при неизменном равновесном расстоянии между атомами – интерполяционное выражение Грюнайзена.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались на Междунар. конференциях “Фазовые переходы и критические явления в конденсированных средах (Махачкала, 2002, 2005); Всероссийск. конференциях “Физическая электроника” (Махачкала, 2003, 2006); IV Междунар. семинарах “Фазовые переходы и нелинейные явления в конденсированных средах” (Махачкала, 2005); IX и X Российск. конференциях по теплофизическим свойст-

вам веществ (С-Петербург, 2005; Москва, 2008); X - XIII Междунар. симпозиумах «Порядок, беспорядок и свойства оксидов» (Ростов-на-Дону, 2007-2010).

**Публикации:** автором опубликовано всего 20 работ. Основных публикаций по теме диссертации – 9, в том числе 4 статьи в центральных рецензируемых научных журналах из списка ВАК.

Исследования, проведенные в настоящей работе, поддержаны грантами: РФФИ Юг России № 06-02-96611 «Закономерности формирования сечения рассеяния квазичастиц при термической деформации материалов выше и ниже температур фазовых переходов второго рода и инверсии знака ангармонизма» 2006-2007гг. и № 09-02-96503-р\_юг\_а «Особенности формирования сечения рассеяния элементарных электронных и тепловых возбуждений в металлических твердых растворах различного типа» 2009 - 2011гг.

Диссертация является обобщением исследований автора, выполненных непосредственно им на кафедре физики твердого тела. Все представленные результаты по электросопротивлению и коэффициенту теплового расширения и образцы для исследования получены лично автором. Математическая и графическая обработка полученных результатов также проведена лично автором. Планирование работы, постановка задачи исследования, корреляционный анализ полученных результатов, расчет характеристических параметров, интерпретация и обобщение выводов проведены совместно с Мурлиевой Ж.Х. и Палчаевым Д.К.

Автор выражает благодарность научному руководителю д.ф.-м.н. Мурлиевой Ж.Х. и научному консультанту по работе – профессору Палчаеву Д.К. (кафедра физики твердого тела Дагестанского госуниверситета); Самудову Ш.М. (кафедра физической электроники Дагестанского госуниверситета) за помощь по определению химического состава полученных сплавов, Пашуку Е.Г. (кафедра экспериментальной физики Дагестанского госуниверситета) за исследования упругих свойств сплавов.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и 10 приложений (таблиц данных), изложенных на 135 страницах, содержит 51 рисунок, 3 таблицы, список цитируемой литературы из 200 источников и список основных опубликованных работ автора из 40 наименований.

Во **введении** отражена актуальность поставленной в работе проблемы, сформулирована цель и перечислены задачи, решение которых было необходимо для ее достижения. Обосновывается выбор подходов к решению данной проблемы и объектов исследования, представлены основные защищаемые положения, научная и практическая ценность, а также новизна полученных результатов.

**В первой главе** приведены результаты анализа теоретических моделей рассеяния электронов на тепловых возбуждениях решетки и некоторые эмпирические факты. Показано, что конечность электропроводности, обусловленной рассеянием на тепловых колебаниях атомов, связывается в основном, с нарастанием амплитуды колебаний атомов. При этом эффектом ангармонизма колебаний, приводящим к изменению равновесного межатомного расстояния и явному ослаблению сил взаимодействия между атомами полностью пренебрегается. Теории электросопротивления и теплового расширения, основанные на гармоническом и квазигармоническом приближениях, не позволяют проводить количественные расчеты, поэтому экспериментальные исследования остаются пока единственным способом оценки этих свойств.

Отмечается, что накопление данных по свойствам чистых металлов и соответствующий корреляционный анализ, позволили эмпирически выявить удобный для расчетов параметр, адекватно отражающий формирование сечения рассеяния квазичастиц на тепловых возбуждениях решетки ионов, экранированных обобществленными электронами. Было установлено [1], что фононное электросопротивление чистых металлов из различных групп таблицы Менделеева линейно связано с их термической деформацией  $\beta T \equiv (\partial V / \partial T)_p (T / V)$ :

$$\rho_i = \rho_0 + \rho_{ph} = \rho_0 + \rho^* \beta_i T, \quad (1)$$

где  $\rho_{ph}$  - фононное электросопротивление металлов при температурах  $T_i$ ,  $\rho^*$  - характеристическое фононное электросопротивление. По сути  $\rho^*$  - это теоретический предел сопротивления для каждого металла, определяемый минимальной длиной свободного пробега электрона.

Однако вопрос о природе формирования сечения рассеяния в сплавах остается открытым. Наличие закономерности, связывающей фононное электросопротивление с термической деформацией при любой температуре, для нормальных металлов явилось основой для решения проблемы интерпретации электросопротивления в сплавах, в том числе упорядочивающихся.

**Во второй главе** приводятся способ изготовления сплавов, методы анализа количественного состава и общая характеристика образцов для исследования. Описаны методика и экспериментальная установка для *in situ* исследований электросопротивления и коэффициента теплового расширения (КТР) металлов на одном и том же образце в интервале 80-1000К.

Показано, что предельная погрешность измерения электросопротивления определяется, в основном, погрешностью определения длины и сечения рабочего участка. Она не превышает 0,5%. Предельная погрешность оценки КТР определяется, в основном, погрешностью определения изменения длины образца ( $\sim 10^{-1}$  м) и не превышает 2-1% при температурах 300-1000К, соответственно.

Контрольные измерения на меди марки МО и нержавеющей стали марки 1Х18Н9Т, подтвердили результаты оценки соответствующих погрешностей.

Достоверность данных по электросопротивлению ( $\rho$ ) и тепловому расширению латуней, полученных в работе, обеспечивается хорошим согласием результатов по этим свойствам большого числа чистых металлов, исследованных на той же установке. Погрешность оценки КТР в широком интервале температур менялась в пределах  $1 \div 5\%$  в зависимости от длины образца и абсолютных значений КТР.

**В третьей главе** приведены результаты исследования электросопротивления и термической деформации ряда ограниченных твердых растворов, электронных соединений и их механических смесей на основе меди и цинка:  $\alpha$ - твердые растворы;  $\beta$ -,  $\gamma$ -,  $\varepsilon$ - электронные соединения; механические смеси -  $\alpha+\beta$ -,  $\beta+\gamma$ -,  $\gamma+\varepsilon$ -,  $\varepsilon+\eta$ . Показано, что значения остаточных сопротивлений  $\alpha$ - твердых растворов подчиняются правилу Нордгейма.

На температурных зависимостях  $\rho$  и коэффициента теплового расширения  $\beta$ -латуни (рис. 1а и 1б) наблюдаются особенности, связанные с переходом структуры из упорядоченного в неупорядоченное (фазовый переход II рода) состояние при  $\sim 730\text{K}$  и эвтектоидным распадом  $\beta$ -фазы на  $\alpha$ - и  $\gamma$ -фазы при температуре  $530\text{K}$ . Упорядоченная фаза  $\beta$ -латуни имеет ОЦК структуру, где атомы Cu и Zn строго чередуются вдоль диагонали куба, в неупорядоченной фазе в той же ОЦК структуре атомы занимают произвольные позиции.

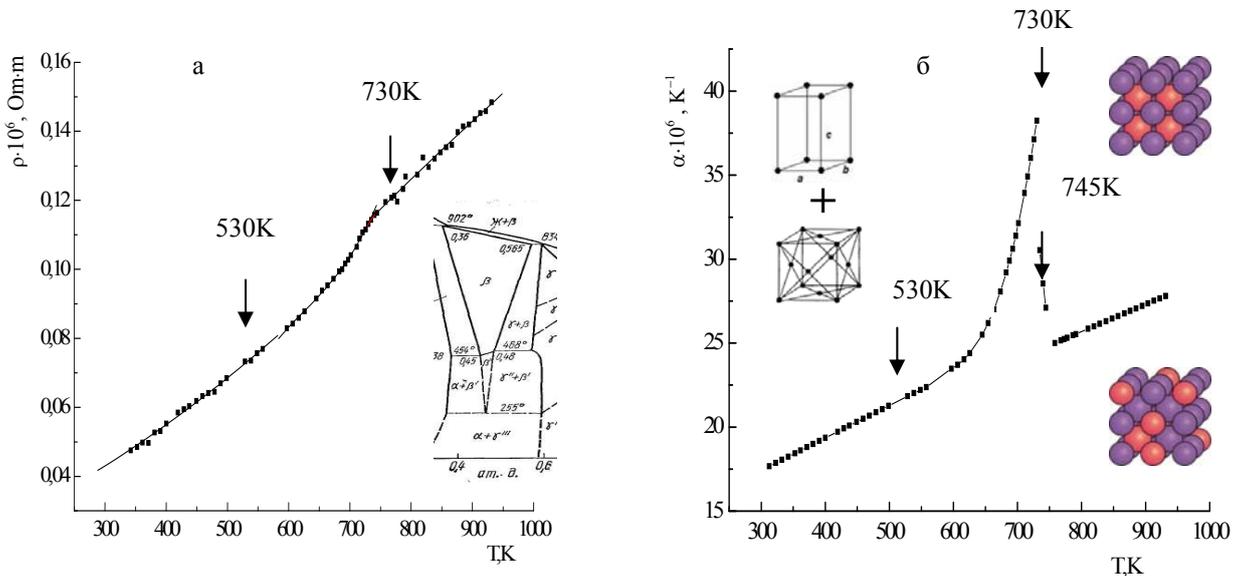


Рис. 1. Зависимости  $\rho=f(T)$  и  $\alpha=f(T)$   $\beta$ -латуни ( $\sim 46,1$  вес.% Zn +  $53,9$  вес.% Cu).

На температурных зависимостях электросопротивления и КТР  $\gamma$ -латуни (рис. 2а и 2б) проявляются особенности, связанные с тем, что вблизи  $\sim 560\text{K}$  решетка этого сплава претерпевает переход от ромбической к сложной ОЦК структуре. Переход  $\gamma$ -латуни к ОЦК структуре (более упорядоченной и симметричной) сопровождается уплотнением решетки за счет разрушения слабых связей в асимметричной ромбической структуре, о чем свидетельствует насыщение зависимости КТР.



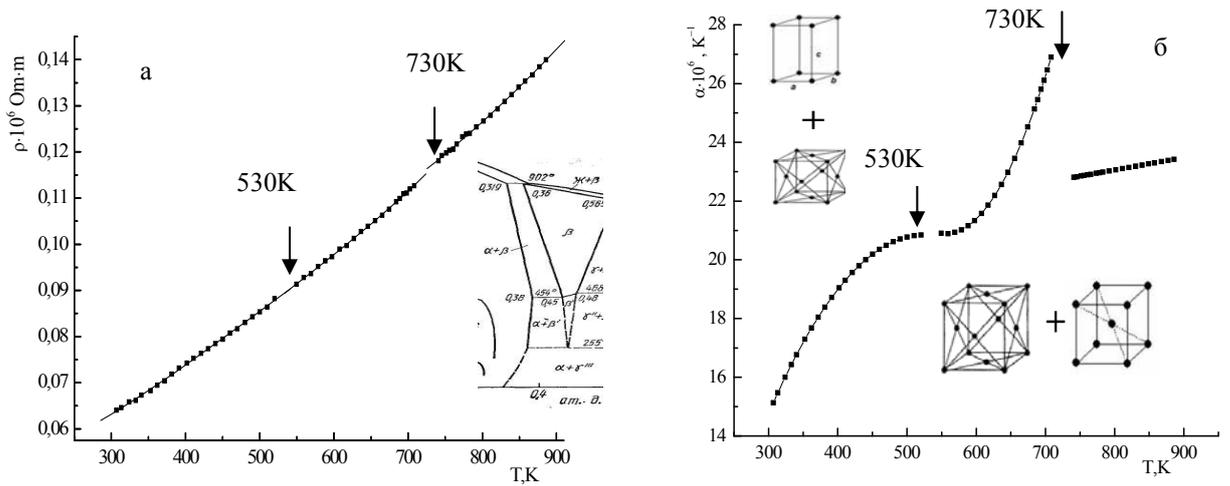


Рис. 4. Зависимости  $\rho=f(T)$  и  $\alpha=f(T)$  смеси  $(\alpha+\beta) \sim 41,8\text{вес.}\% \text{Zn}+58,2\text{вес.}\% \text{Cu}$ .

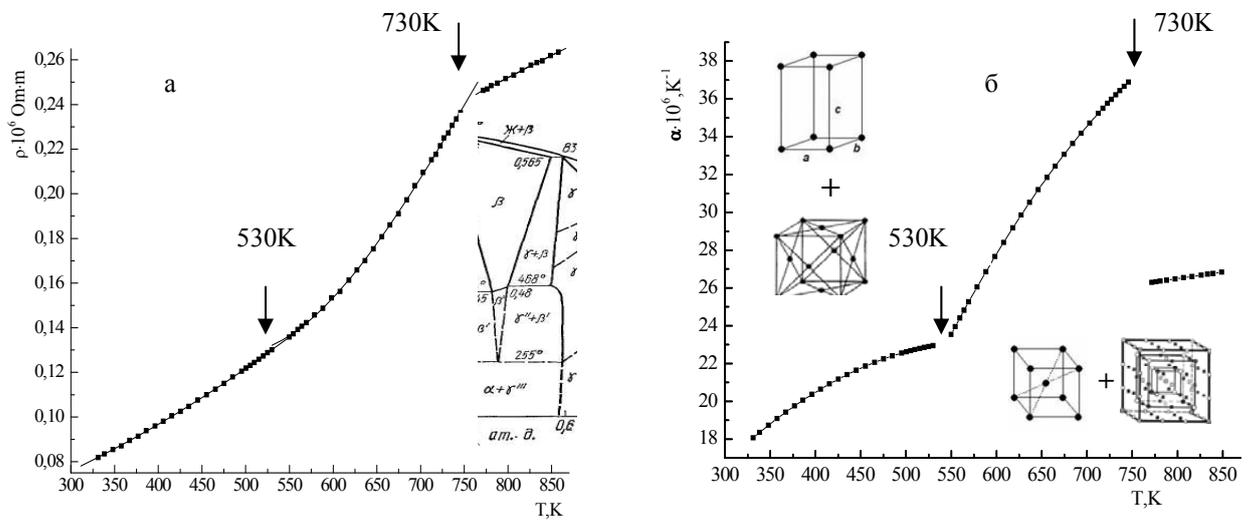


Рис. 5. Зависимости  $\rho=f(T)$  и  $\alpha=f(T)$  смеси  $(\beta+\gamma) \sim 53,0 \text{ вес.}\% \text{Zn}+47,0 \text{ вес.}\% \text{Cu}$ .

Зависимости  $\rho=f(T)$  и  $\alpha=f(T)$  механические смеси  $\gamma+\epsilon$  и  $\epsilon+\eta$  представлены на рисунках 6а и 6б и 7а и 7б соответственно

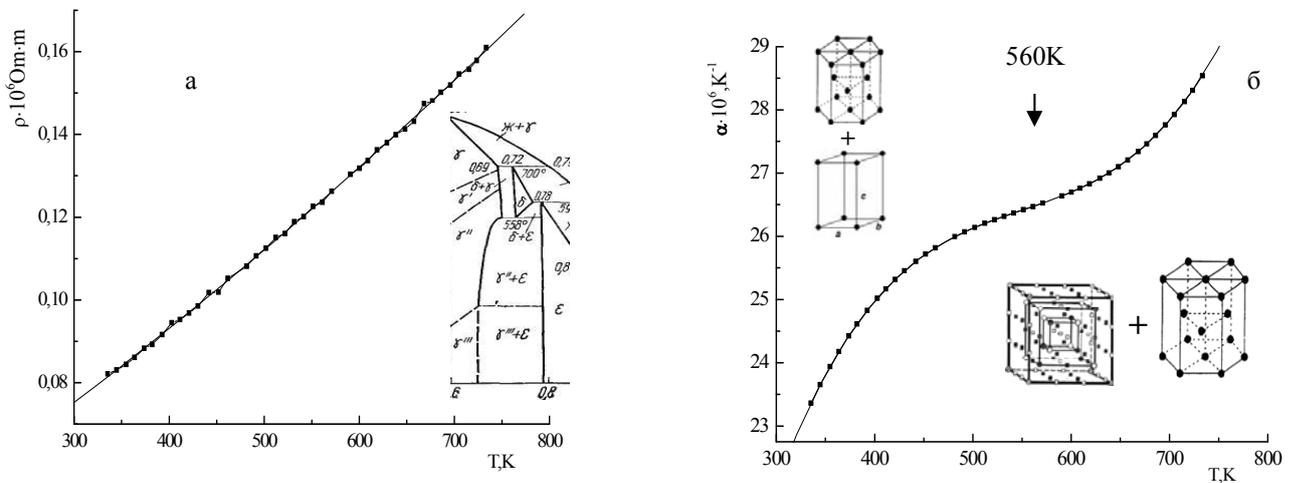


Рис. 6. Зависимости  $\rho=f(T)$  и  $\alpha=f(T)$  твердого раствора  $(\gamma+\epsilon) \sim 73,3 \text{ вес.}\% \text{Zn}+26,7 \text{ вес.}\% \text{Cu}$ .

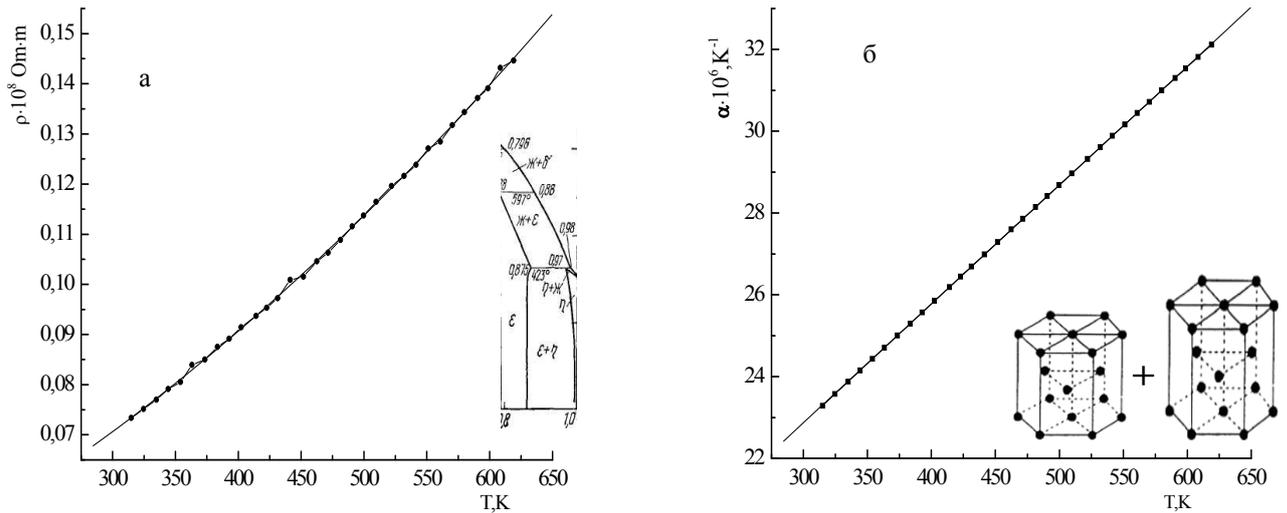


Рис. 7. Зависимости  $\rho=f(T)$  и  $\alpha=f(T)$  твердого раствора ( $\epsilon+\eta$ ) ~ 87,8 вес.% Zn+2, вес.% Cu.

Отклонение концентрационной зависимости коэффициента теплового расширения при 300К от аддитивной отрицательно, что свидетельствует о некотором усилении сил межатомного взаимодействия. При повышении температуры до 800К эта зависимость приближается к аддитивной.

Отклонение концентрационной зависимости электросопротивления от аддитивной положительно. Наблюдаются особенности: в виде увеличения этого отклонения для  $\gamma$ -фазы с повышением температуры; электросопротивление  $\beta$ -фазы при всех температурах близко к аддитивной зависимости; отклонение электросопротивления  $\epsilon$ - фазы существенно и почти не зависит от температуры. Низкие значения сопротивления  $\beta$ -фазы связаны с наличием дальнего и ближнего порядка соответственно. Увеличение электросопротивления  $\epsilon$ - и  $\gamma$ -фаз связано со статическим беспорядком в этих сплавах, причем для последнего этот беспорядок возрастает с температурой.

**В четвертой главе** приведены результаты корреляционного анализа данных по электросопротивлению и тепловому расширению исследованных сплавов. Анализ для этих сплавов проводился, поскольку было установлено [1], что фононное электросопротивление чистых металлов (1) линейно связано с их термической деформацией  $\beta T$ .

Результаты корреляционного анализа  $\alpha$ - латуней трех составов [2] приведены на рисунке 8. Коэффициенты корреляции ( $r$ ) соответствующих линейных зависимостей (2)-(4) близки к единице. Угловые коэффициенты в этих выражениях – это характеристические электросопротивления для соответствующих составов  $\alpha$ - фазы.

$$\rho \cdot 10^{-6} = 0,022 + 1,18 \cdot \beta T \quad (r = ,9997) \quad (2)$$

$$\rho \cdot 10^{-6} = 0,038 + 1,29 \cdot \beta T \quad (r = ,9997) \quad (3)$$

$$\rho \cdot 10^{-6} = 0,043 + 1,35 \cdot \beta T \quad (r = ,9997) \quad (4)$$

Как видно, вклад в электросопротивление, обусловленный рассеянием электронов на статических дефектах (первое слагаемое), а так же значения угловых коэффициентов в этих выражениях, с повышением концентрации

цинка возрастает. Это указывает на отсутствие особенностей формирования характеристического электросопротивления и температурной зависимости

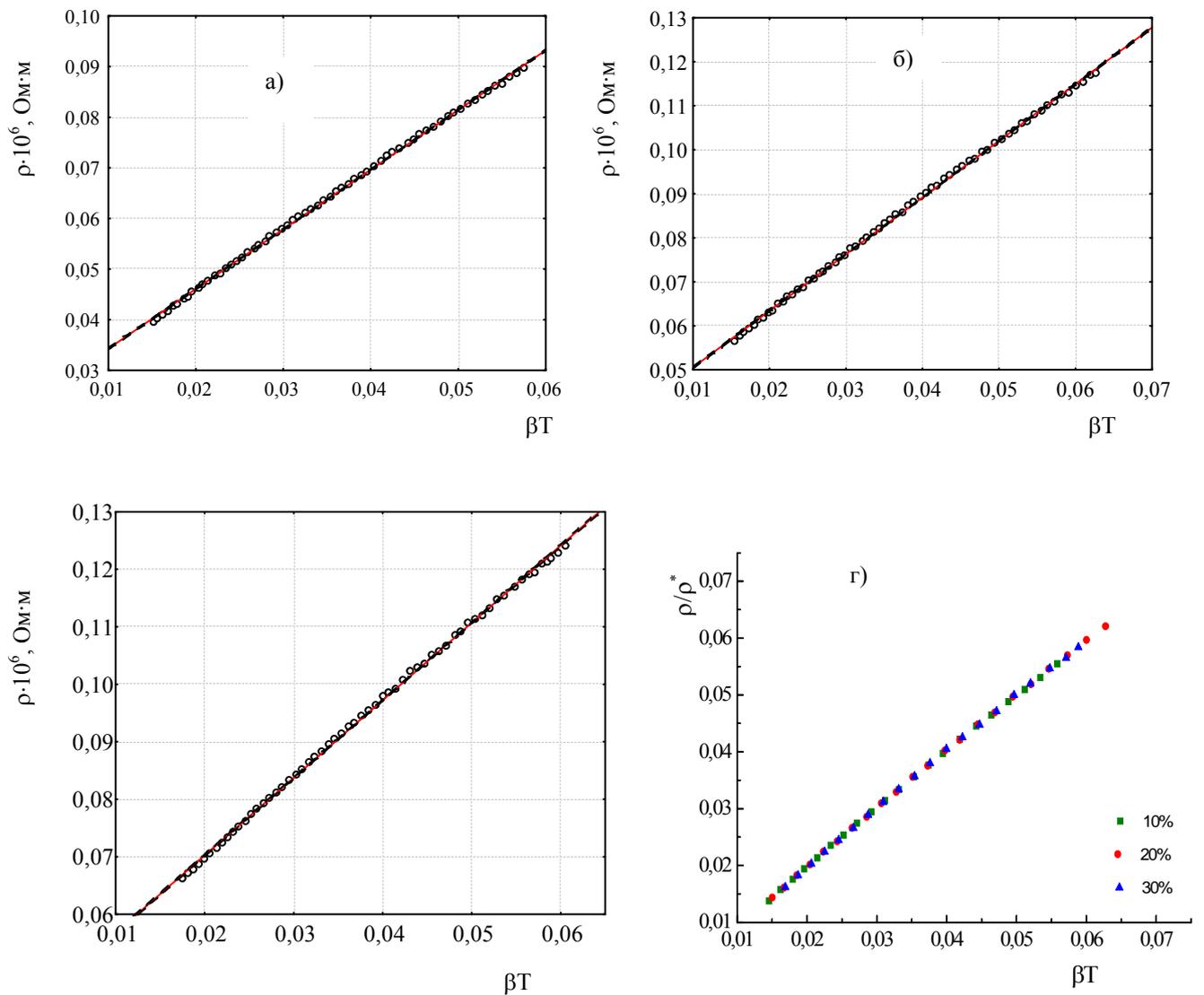


Рис. 8. Корреляция  $\rho$  -  $\beta T$  для: а)  $\sim$ Zn 10 %; б)  $\sim$  Zn 20 %; в)  $\sim$  Zn 30 %, г) зависимость  $\rho^{ph}/\rho^*$  от  $\beta T$  для всех составов  $\alpha$ -латуни.

$\rho$  в  $\alpha$ -латунях. Механизмы рассеяния на статических и динамических дефектах здесь такие же, как и в относительно чистых металлах. Возрастание концентрации второй компоненты приводит к возрастанию остаточного электросопротивления, хотя они получены экстраполяцией к 0К от комнатных температур.

Несмотря на то, что угловые коэффициенты в уравнениях (2)-(4) различны, значения приведенного электросопротивления от термической деформации для трех сплавов, ложатся на одну прямую. Известно [3], что характеристическое электросопротивление ( $\rho^*$ ) пропорционально межатомному расстоянию ( $a$ ):

$$\rho^* \approx 10(\hbar/e^2) a \quad (5)$$

Поэтому увеличение значения  $\rho^*$  для  $\alpha$ - фазы в зависимости от концентрации второй компоненты (цинка) объясняется увеличением межатомного расстояния в среднем по решетке меди при возрастании содержания цинка.

Электронные соединения (фазы Юм-Розери) имеют структуры, отличные от структур исходных компонент, в связи с чем, механизм формирования температурных зависимостей в  $\beta$  -,  $\gamma$ - и  $\varepsilon$ - латунях, в том числе в соответствующих фазах, различны. На рисунках 9 – 12 приведены результаты корреляционного анализа данных по электросопротивлению и термической деформации  $\beta$  -,  $\gamma$ - и  $\varepsilon$ - латуней.

Поскольку для состава (46,1 вес.%Zn+53,9 вес.%Cu) ниже 530К  $\beta$ - упорядоченной фазе предшествует механическая смесь  $\alpha+\gamma'''$ , мы провели анализ и для этой фазы. Для этих латуней, как и для чистых металлов, а также  $\alpha$ -твердого раствора, связь  $\rho$ - $\beta T$  линейна [4,5,6-9], а коэффициенты корреляции ( $r$ ) соответствующих зависимостей (6)-(8) близки к единице:

$$(\alpha+\gamma''') \quad \rho \cdot 10^6 = ,01879 + 1,5605 \cdot \beta T \quad r = ,9986 \quad T < 530\text{K} \quad (6)$$

$$\beta\text{-латунь:} \quad \rho \cdot 10^6 = ,06015 + ,64449 \cdot \beta T \quad r = ,9955 \quad T < T_K \quad (7)$$

$$\rho \cdot 10^6 = ,04070 + 1,3851 \cdot \beta T \quad r = ,9960 \quad T > T_K \quad (8)$$

Угловой коэффициент – характеристическое электросопротивление  $\rho^*_{\text{уп}}$  в упорядоченной  $\beta$ -фазе существенно ниже значения  $\rho^*_{\text{неуп}}$  в неупорядоченной фазе и, даже значений для  $\alpha$ -фазы с меньшей концентрацией цинка. Это связано с упорядочением структуры [7], а следовательно, с возрастанием периодического потенциала решетки.

Анализ характеристических электросопротивлений в упорядоченной и неупорядоченной фазах  $\beta$ -латуни и сравнение их со значениями  $\rho^*$  для чистых Cu и Zn привел к интересному результату [4,9,1]. Характеристическое электросопротивление ниже  $T_K$  ( $\rho^*_{\text{уп}}$ ) имеет значение, соответствующее результирующему сопротивлению решеток Cu и Zn ( $\rho^*_{\text{Cu}} = 1,2 \cdot 10^{-6}$  Ом·м и  $\rho^*_{\text{Zn}} = 2,16 \cdot 10^{-6}$  Ом·м [10]) при их "параллельном" включении:

$$\rho^*_{\text{уп}} = \frac{\rho^*_{\text{Cu}} \rho^*_{\text{Zn}}}{\rho^*_{\text{Cu}} + \rho^*_{\text{Zn}}} = 0,77 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м} \quad (9)$$

Это, вероятно, связано с порядком расположения атомов в упорядоченной фазе, т.е. атомные плоскости Cu и Zn образуют слоистую систему. Каждый слой представляет самостоятельный проводник, поэтому характеристическое сопротивление не зависит от долевого вклада меди и цинка в сплав. В неупорядоченной фазе атомы Cu и Zn расположены произвольно, хотя структура и остается объемноцентрированной. Согласно модели, рассмотренной в [11], эту структуру можно представить, как «случайную сетку сопротивлений, т.е. набор проводников, беспорядочно соединенных друг с другом по какому-то вероятностному закону». Поскольку смысл характеристического электросопротивления в том, что это – суть теоретический предел, его в неупорядоченной фазе можно определить как сопротивление «последовательно соединенных проводников», т.е. характеристические электросопротивления чистых металлов будут складываться с учетом долевого вклада:

$$\rho_{\text{неуп}}^* = 0,539 \cdot \rho_{\text{Cu}}^* + 0,461 \rho_{\text{Zn}}^* = 1,64 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м} \quad (10)$$

Значения  $\rho_{\text{уп}}^*$  и  $\rho_{\text{неуп}}^*$ , рассчитанные по (9) и (10), согласуются со значениями в (7) и (8) в пределах погрешности определения этих величин.

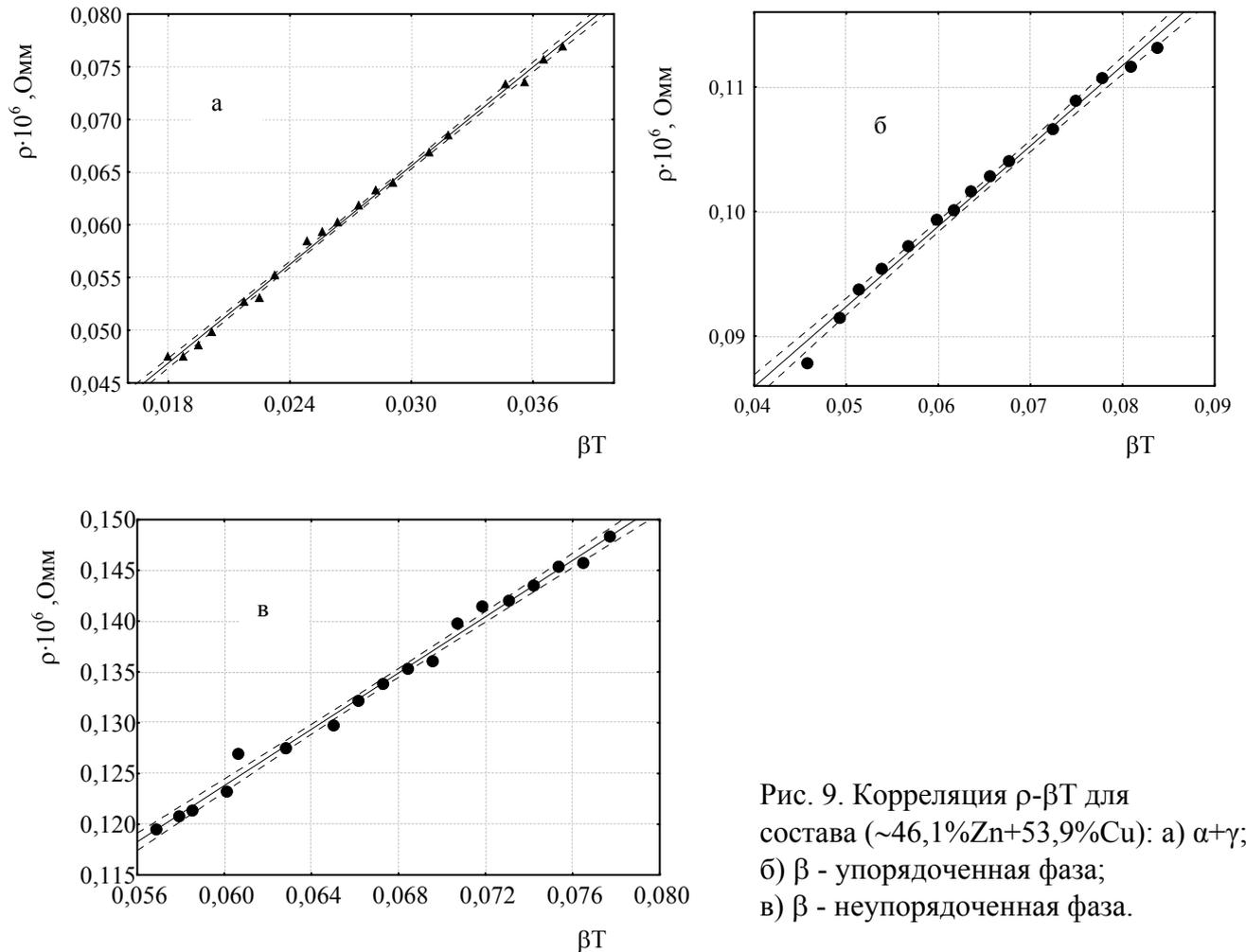


Рис. 9. Корреляция  $\rho$ - $\beta T$  для состава ( $\sim 46,1\% \text{Zn} + 53,9\% \text{Cu}$ ): а)  $\alpha + \gamma$ ; б)  $\beta$  - упорядоченная фаза; в)  $\beta$  - неупорядоченная фаза.

Корреляционный анализ для  $\gamma$ -латуни приводит к уравнениям:

$$\rho \cdot 10^6 = 0,04229 + 2,2950 \cdot \beta T \quad r = ,9950 \quad T < 560 \text{K} \quad (11)$$

$$\rho \cdot 10^6 = 0,03969 + 2,4294 \cdot \beta T \quad r = ,9978 \quad T > 560 \text{K} \quad (12)$$

Как видно, значения характеристических электросопротивления в  $\gamma$ -фазе выше, чем в  $\beta$ -фазе. У этого сплава упаковка рыхлая как ниже, так и выше температуры (560K), где ромбическая фаза переходит в сложную объемноцентрированную. Несмотря на то, что выше 560K структура  $\gamma$ -латуни частично упорядочивается, соответствующее характеристическое электросопротивление  $\gamma$ -латуни несколько выше, чем для ромбической фазы. Возможно, это связано с тем (см. выражение (5)), что в сложной ОЦК структуре межатомное расстояние больше.

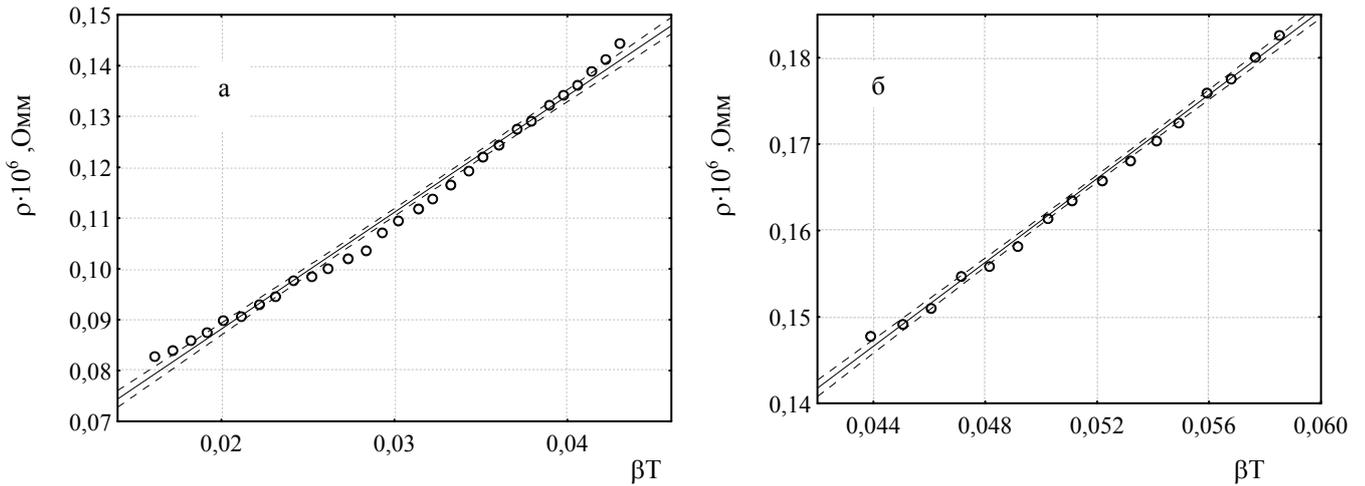


Рис. 10. Корреляция  $\rho$ - $\beta T$  для  $\gamma$ -латуни: а)  $T < 560\text{K}$ ; б)  $T > 560\text{K}$ .

Характеристическое электросопротивление  $\varepsilon$ -фазы, как следует из выражения (13), аномально высокое среди значений для всех исследованных сплавов:

$$\rho \cdot 10^6 = ,10441 + 3,3089 \cdot \beta T \quad r = ,9987 \quad (13)$$

Возможно, это связано с тем, что  $\rho^*$  формируется не только за счет эффекта увеличения межатомного расстояния (ослабления связи), но и эффекта увеличения области искажения решетки при возрастании концентрации атомов другого сорта. Увеличение размера области искажения решетки в этой фазе, по сравнению с чистым Zn, может быть связано с тем, что у  $\varepsilon$ -фазы отношение  $c/a$ , как уже отмечалось, меньше, чем у Zn. Более того, плотность упаковки возрастает с увеличением концентрации меди, атомы которой при этом могут увеличивать размеры искаженной области решетки атомов цинка.

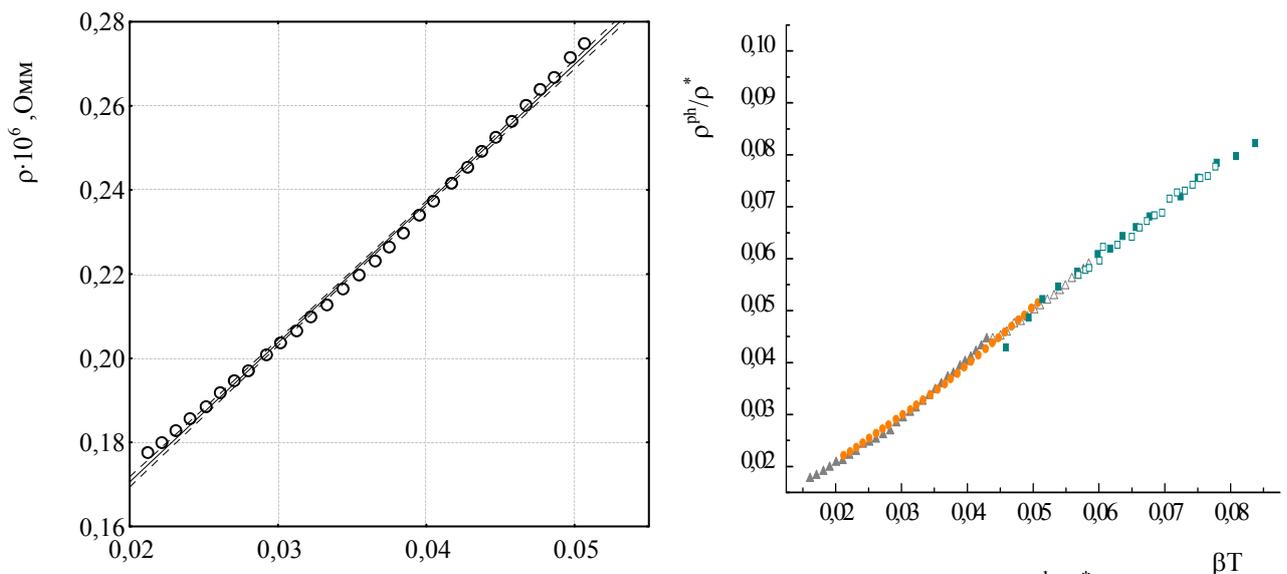


Рис. 11. Корреляция  $\rho$ - $\beta T$  для  $\varepsilon$ -латуни.

Рис. 12. Корреляция  $\rho^{ph}/\rho^* - \beta T$  для:  $\square, \blacksquare$  -  $\beta_{уп}, \beta_{неуп}$  фазы;  $\blacktriangle, \triangle$  -  $\gamma$  фазы ( $T < 560\text{K}$  и  $T > 560\text{K}$ );  $\bullet$  -  $\varepsilon$  фазы.

## Заключение

Впервые проведены *in situ* исследования электросопротивления и теплового расширения твердых растворов Cu-Zn, в том числе претерпевающих упорядочение, и механических смесей на их основе в широком интервале температур. Установлено, что характерные особенности в виде скачков температурных коэффициентов электросопротивления и теплового расширения согласуются с границами фаз на уточненной диаграмме состояния построенной по данным различных свойств.

Структурные особенности, а так же явления упорядочения и статического беспорядка соответствующих фаз электронных соединений на основе меди и цинка приводят к существенному различию абсолютных значений и характера температурных зависимостей электросопротивления и теплового расширения. В гамма фазе, в отличие от бета фазы, температурные зависимости производных сопротивления и абсолютной деформации по температуре насыщаются в упорядоченной и неупорядоченной фазах ввиду уплотнения упаковки. Температурные зависимости электросопротивления и теплового расширения механических смесей:  $\alpha+\beta$ ,  $\beta+\gamma$  и  $\gamma+\epsilon$  наследуют аномалии свойств электронных соединений, связанные с переходом соответствующих фаз в упорядоченное состояние и в состояние со статическим беспорядком. Причем, скачки производных электросопротивления и длины образца по температуре, приходятся на температуру Курнакова  $\beta$ -латуни. Однако на ход температурной зависимости КТР в смеси  $\beta+\gamma$  вблизи  $T_K$  сильнее сказывается влияние особенностей поведения  $\gamma$ -фазы.

Отклонение концентрационных зависимостей коэффициента теплового расширения и электросопротивления сплавов от аддитивных при 300К отрицательно и положительно, соответственно, что свидетельствует об ослаблении сил межатомного взаимодействия при возрастании доли второго компонента. При повышении температуры до 800К эти зависимости приближаются к аддитивным.

На концентрационной зависимости электросопротивления наблюдаются особенности в виде увеличения этого отклонения для  $\gamma$ -фазы с повышением температуры; электросопротивление  $\beta$ -фазы при всех температурах близко к аддитивной зависимости; отклонение электросопротивления  $\epsilon$ -фазы существенно и почти не зависит от температуры. Низкие значения сопротивления  $\beta$ -фазы связаны с наличием дальнего и ближнего порядка соответственно.

Увеличение электросопротивления  $\epsilon$ - и  $\gamma$ -фаз связано со статическим беспорядком в этих сплавах, причем для последнего этот беспорядок возрастает с температурой.

В результате корреляционного анализа данных по электросопротивлению и тепловому расширению исследованных сплавов на основе меди и цинка установлено, что зависящий от температуры вклад в общее электросопротивление в каждой из фаз, линейно связан с произведением коэффициента теплового расширения на температуру.

Концентрационная зависимость характеристического электросопротивления сплавов близка к аддитивной кроме  $\beta$ -упорядоченной фазы,  $\gamma$ - и  $\epsilon$ -латуней. Аномально низкое значение для  $\beta$ -упорядоченной фазы связано с возрастанием периодичности потенциала решетки. Относительно высокие значения характеристического электросопротивления для  $\gamma$ - и  $\epsilon$ - фаз связаны с тем, что потенциал рассеяния в этих фазах зависит не только от увеличения межатомного расстояния, но и возрастания статического беспорядка.

Результаты, полученные в работе, указывают на то, что природа формирования потенциала рассеяния электронов на элементарных тепловых возбуждениях в сплавах, как и в чистых металлах, определяется не только амплитудой теплового возбуждения но и относительной термической деформацией. Эмпирическая оценка характеристических электросопротивлений позволит получать объективные данные по температурным зависимостям электросопротивлений проводников, в том числе в виде пленок и наночастиц, в различных фазах, по результатам исследования коэффициента теплового расширения, например, рентгеновским методом.

### Цитируемая литература

1. Abdulagatov, I.M. Thermal Expansion and Kinetic Coefficients of Crystals// J. Phys. Chem. Solids./ I.M. Abdulagatov. Zh.Kh. Murlieva, D.K.Palchaev, K.K. Kazbekov, M.M. Maangalov //J. of Physics and Chemistry of Solids. – 2007. –V. 68. – p. 1713-1720.
2. Ж.Х. Мурлиева. Электросопротивление и термическая деформация  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\epsilon$ -латуней / Ж.Х. Мурлиева, Д.К. Палчаев, М.Э. Исхаков, Д.Г. Черных// XII Росс. конф. по теплофизическим свойствам веществ: сб. тез.// – Москва. – 2008. – С. 148.
3. Гантмахер В.Ф. Электроны в неупорядоченных средах. - М.: Физматлит, 2003. 174 с.
4. Гантмахер В.Ф. Электроны в неупорядоченных средах. - М.: Физматлит, 2003. 174 с.
5. Murlieva Zh.Kh., Palchaev D.K., Iskhakov M.E. Correlation Between Resistivity and Thermal Deformation of Cu-Zn Solid Solutions and Electronic Combinations// Abstracts of 17th Symposium on Thermophysical Properties (Boulder, Colorado, June 21-26, 2009). P. 61-62.
6. Мурлиева Ж.Х., Палчаев Д.К., Борзов Е.Д., Исхаков М.Э., Акаев Ф.А. Зависимость электросопротивления никеля и  $\beta$ -латуни от относительной термической деформации в упорядоченной и неупорядоченной фазах// Тез. XI Российской конф. по теплофизическим свойствам веществ, С-Петербург, 4-7 окт. 2005, с.48

7. Мурлиева Ж.Х., Палчаев Д.К., Казбеков К.К., Исхаков М.Э. Новый метод оценки параметра порядка на примере никеля и бета-латуни // Письма в ЖТФ, 2006, т. 32, в.16, С. 28-35.
8. Палчаев Д.К., Мурлиева Ж.Х., Исхаков М.Э., Акаев Ф.А., Борзов Е.Д., Зависимость электросопротивления от термической деформации упорядочивающихся сплавов меди и цинка// Тр. X м/н сим. ODPO «Порядок, беспорядок и свойства оксидов» (Ростов-на-Дону, 2007), т. 3, с. 12-15.
9. Борзов Е.Д., Мурлиева Ж.Х., Палчаев Д.К., Мурлиев А.К., Исхаков М.Э. Связь электросопротивления  $\beta$ -латуни с изобарной термической деформацией// Сб. мат. III Всероссийской конференции по физической электронике, Махачкала, 23-26 сентября 2003 г. – С. 212-215.
10. Охотин А.С. Теплопроводность твердых тел./Справ. –М.: Энергоиздат. 1984. - 321с.
11. Физика металлов. 1. Электроны/Под. Ред. Дж. Займана, М.: Мир, -1972. – 644 с.

#### Основные публикации автора по теме диссертации:

1. Е.Д. Борзов. Связь электросопротивления  $\beta$ -латуни с изобарной термической деформацией./ Е.Д. Борзов, Ж.Х. Мурлиева, Д.К. Палчаев, А.К. Мурлиев, **М.Э. Исхаков** // III Всеросск. конф. по физич. электронике: сб. науч. трудов. / ДагГУ – Махачкала: Изд-во ИПЦ ДагГУ, 2003. – С. 212-215.
2. Мурлиева, Ж.Х. Зависимость электросопротивления никеля и  $\beta$ -латуни от относительной термической деформации в упорядоченной и неупорядоченной фазах. / Ж.Х. Мурлиева, Д.К. Палчаев, Е.Д. Борзов, **М.Э. Исхаков**, Ф.А. Акаев // Тез. XI Российской конф. по теплофизическим свойствам веществ, С-Петербург, 4-7 окт. 2005. с.48.
3. Мурлиева, Ж.Х. Новый метод оценки параметра порядка на примере никеля и бета-латуни. / Ж.Х. Мурлиева, Д.К. Палчаев, К.К. Казбеков, **М.Э. Исхаков** // Письма в «Журнал технической физики». – 2006. – Т. 32, №16. – С. 28-35.
4. Мурлиева, Ж.Х. Зависимость электросопротивления никеля и  $\beta$ -латуни от изобарной термической деформации в упорядоченной и неупорядоченной фазах. / Ж.Х. Мурлиева, Д.К. Палчаев, Е.Д. Борзов, **М.Э. Исхаков**, Ф.А. Акаев // Теплофизика высоких температур. – 2007. – Т.45, № 6. – С.1-6.
5. Палчаев, Д.К. Зависимость электросопротивления от термической деформации упорядочивающихся сплавов на основе меди и цинка. / Д.К. Палчаев, Ж.Х. Мурлиева, **М.Э. Исхаков**, Е.Д. Борзов // X Междунар. симп. «Порядок - беспорядок и свойства оксидов» (ODPO-10): сб. научных трудов. – Ростов-на-Дону: Изд-во ИПО ПИ ЮФУ, 2007. – Ч. 3. – С. 12-15.
6. Murlieva, Zh.Kh. Correlation Between Resistivity and Thermal Deformation of Cu-Zn Solid Solutions and Electronic Combinations./ Zh.Kh. Murlieva, D.K.

- Palchaev, **M.E. Iskhakov** // Abstracts of 17th Symposium on Thermophysical Properties (Boulder, Colorado, June 21-26, 2009). P. 61-62.
7. **Исхаков, М.Э.** Электросопротивление и тепловое расширение на основе Cu и Zn. / М.Э. Исхаков, Ж.Х. Мурлиева, Д.К. Палчаев // XIII Междунар. симп. «Порядок - беспорядок и свойства оксидов» (ODPO-13): труды симп. – Ростов-на-Дону: Изд-во СКНЦ ВШ ЮФУ АПСН, 2010. – Т. 2. – С. 31-34.
  8. Палчаев, Д.К. Формирование сечения рассеяния электронов на тепловых возбуждениях решетки в нержавеющей стали./ Д.К. Палчаев, Ж.Х. Мурлиева, **М.Э. Исхаков**, А.Г. Мозговой, М.П. Фараджева // Известия РАН. Серия физическая. 2010. Т.74. №5. С. 693-696.
  9. **Исхаков, М.Э.** Электросопротивление и тепловое расширение на основе Cu и Zn. / М.Э. Исхаков, Ж.Х. Мурлиева, Д.К. Палчаев / Известия РАН. Серия физическая. 2011. Т.75. №5.(в печати).