

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Морозовой А.И. на тему
**«Эволюция структуры и физико-механических свойств
низколегированных сплавов системы Cu-Cr-Zr в процессе
деформационно-термической обработки»** на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика
конденсированного состояния

Актуальность темы исследования

На сегодняшний день существует необходимость повышения прочностных свойств проводящих материалов при сохранении характеристик электропроводности. В связи с этим в последние годы большое внимание уделяется развитию новых подходов к повышению механических свойств в сплавах системы Cu-Cr-Zr, которые отличаются высокой электропроводностью после старения. Известно, что одним из самых эффективных способов повышения прочностных свойств является обработка сплавов методами интенсивной пластической деформации (ИПД), в частности методом равноканального углового прессования (РКУП). К настоящему времени накоплен богатый экспериментальный опыт получения металлических материалов различными способами ИПД обработки, однако вопросы, касающиеся основных механизмов структурных изменений в сплавах системы Cu-Cr-Zr в процессе деформации при повышенной температуре, а также влияние формирующейся структуры на прочностные и функциональные свойства требуют более глубокого систематического анализа. Кроме того, на момент постановки исследования открытым оставался вопрос о фазовых превращениях в сплавах Cu-Cr-Zr в процессе старения. В этой связи диссертация Морозовой А. И., посвященная изучению закономерностей влияния деформационно-термической обработки на фазовый состав, микроструктуру, прочность и электропроводность сплава системы Cu-Cr-Zr, является важной и актуальной.

Оценка структуры и содержания работы

Работа изложена на 144 страницах машинописного текста, включает введение, 5 глав, основные выводы, список сокращений и условных обозначений и список литературы из 231 наименования.

Во введении представлены актуальность, цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость работы, приведены положения, выносимые на защиту. В первой главе приведен анализ имеющейся литературы

относительно фазовых превращений в сплавах системы Cu-Cr, Cu-Zr и Cu-Cr-Zr. Описаны механизмы упрочнения сплавов, приведены литературные данные о влиянии легирующих элементов на прочностные и пластические характеристики Cu-Cr-Zr бронз. Приведены данные об износостойкости бронз и ее связи с твердостью. Особое внимание уделено анализу литературы о влиянии деформации на структурные изменения в меди и ее сплавах. Приведено обоснование выбора материала исследования. Во второй главе описаны материал и методики исследования. В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований фазового состава бронз и влияния старения на прочность и электропроводность Cu-Cr-Zr сплавов, представлен способ оценки объёмной доли выделяющихся частиц по изменению электрической проводимости, а также способ расчета предела текучести сплавов. В четвертой главе рассмотрены результаты изучения эволюции структуры сплавов в процессе равноканального углового прессования при повышенной температуре, представлены модели кинетики непрерывной динамической рекристаллизации, модель изменения размера зерна и плотности дислокаций с ростом степени деформации. В пятой главе представлены результаты исследования физико-механических свойств сплавов, подвергнутых РКУП до различных степеней деформации. Проанализированы вклады различных факторов упрочнения в предел текучести, а также вклады различных дефектов кристаллической решетки в прирост электросопротивления сплава системы Cu-Cr-Zr. Приведены данные о трибологических свойствах бронз. В заключении приведены основные выводы по диссертационной работе.

Основное содержание диссертации, выводы и положения, выносимые на защиту, достаточно полно отражены в автореферате.

В качестве наиболее **важных научных результатов работы, определяющих ее новизну**, следует отметить следующие:

1. Физическая модель изменения размера зерна и плотности дислокаций в процессе РКУП Cu-Cr-Zr сплавов.
2. Анализ вкладов различных механизмов упрочнения в предел текучести на основе физической модели изменения параметров структуры, представленной в диссертации.
3. Повышение электрической проводимости в сплавах Cu-Cr-Zr с пересыщенным твердым раствором в процессе РКУП при повышенной температуре. Анализ различных факторов рассеяния электронов на дефектах на основе физической модели изменения параметров структуры, представленной в диссертации.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Научные положения, выносимые на защиту, выводы и рекомендации, представленные в работе, обоснованы физически адекватной интерпретацией экспериментальных данных, сопоставлением полученных результатов с существующими и вновь разработанными на базе полученных результатов моделями. Представленные в работе результаты признаны отечественной и зарубежной научной общественностью, прошли широкое обсуждение на российских и международных научных конференциях и опубликованы в рецензируемых научных журналах, входящих в международные базы цитирования WOS и Scopus и в перечень журналов рекомендованных ВАК.

Достоверность и новизна полученных результатов

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием современных взаимодополняющих независимых методов исследования структуры и свойств металлических материалов. Результаты диссертационной работы качественно совпадают с результатами, представленными в независимых источниках по данной тематике. Новизна полученных результатов подтверждается патентоспособностью разработанного на основе установленных в диссертации закономерностей способа обработки медных сплавов.

Теоретическая и практическая значимость полученных автором результатов

Теоретическая значимость обоснована тем, что в диссертации предложены физические модели структурных изменений, изучены структурные механизмы упрочнения и выполнен сравнительный анализ вкладов структуры и дефектов кристаллического строения в электросопротивление медных сплава. Значение полученных результатов исследования для практики подтверждается разработанными режимами деформационно-термической обработки медных сплавов.

Замечания и комментарии к диссертационной работе

Литературный обзор

- недостаточно аргументирован выбор объектов исследования, а также метода и температуры интенсивной деформации ($T_{РКУП}=400\text{ }^{\circ}\text{C}$). Альтернативой могли бы быть нанокпозиционные сплавы Cu/Cu-Nb с более высокими характеристиками прочности и электропроводности, а также традиционные методы ОМД (прокатка, волочение) для получения длинномерных изделий.

- убедительным аргументом цели работы могли бы быть примеры действующих электротехнических устройств и технических требований к ним, иллюстрирующие необходимость иметь одновременно высокие электропроводность, прочность и износостойкость.

- известны аналогичные по теме работы и патенты с применением РКУП к медным низколегированным сплавам близкого состава. В чем автор видит преимущества своей работы?

Методики

Стр.47 – ошибочно указан знак «-» для степени плотности дислокаций ($0.3 \cdot 10^{13}$);

Стр.48, рис.2.1б и 2.2б – не согласованы подрисуночные подписи и обозначения;

Стр.49 упрочнение при старении для сплавов в недеформированном состоянии исследовано разными методами твердости (НВ и Нv), а после РКУП методом растяжения, что создает путаницу при анализе и затрудняет корректное сравнение влияния химического состава или деформации;

Стр.50-51 – поскольку в работе используется понятие истинной деформации ($\epsilon = 1.16$ за один проход), то словосочетание «степень деформации» не корректно и деформацию правильнее определять числом проходов $N=1,2,4,8$.

Стр.59 – в методике определения износостойкости нет сведений, касающихся шероховатости поверхности и размера образцов, расстояния точки контакта от оси вращения, учитывался ли и как износ контртела (шарика).

Результаты

- Результаты исследования относятся к РКУП образцам размерами 14x14 x 80 мм, являющимися предположительно полуфабрикатами. Неясно, как будет осуществляться получение длинномерных заготовок и как изменятся их свойства при изготовлении готовых изделий (например, контактного провода);

- Было бы полезным представить обобщенный график зависимости электропроводности от прочности для обоих сплавов при разных условиях получения. Это облегчает выбор сплава и оптимальных условий обработки для конкретных применений;

- Остается неясным, достаточным ли является достигнутый уровень прочности (715 МПа), электропроводности и износостойкости, для решения проблемы высокоскоростного транспорта (400 км/час);

- При оценке кратковременной термостабильности (или термостойкости) сплавов автор ограничилась исследованием влияния температуры отжига в течение 1 часа на твердость. Однако для проводниковых материалов важным требованием, определяющим ресурс изделия, является характеристика длительной термостабильности, которая задается уровнем прочности после выдержки при температуре эксплуатации в течение нескольких сотен часов.

Сделанные замечания не снижают общей положительной оценки диссертационной работы и ее научной и практической ценности.

