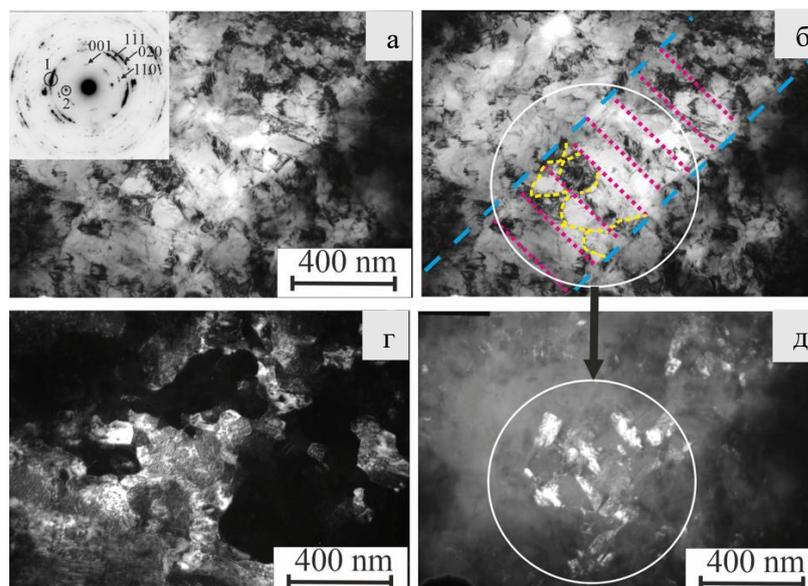


Формирование высокопрочного упорядоченного состояния в сплаве Cu-56Au (ат.%)

А.Ю. Волков, О.С. Новикова, Д.А. Комкова, Е.Ф. Таланцев, Е.Г. Волкова, Н.А. Кругликов, П.О. Подгорбунская, А.А. Гаврилова

Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург

Проведено исследование эволюции структуры и формирования свойств в ходе фазового превращения беспорядок→порядок в нестехиометрическом сплаве Cu-56Au (ат.%) в интервале температур 250-375°C (с шагом 25°). Построены зависимости доли упорядоченной фазы, прочностных свойств и удельного электросопротивления от продолжительности отжига образцов, исходное разупорядоченное состояние в которых достигалось закалкой от 600°C или предварительной деформацией на 75%. Уточнены температурные интервалы образования упорядоченных CuAuI и CuAuII фаз, а также двухфазных состояний (CuAuI+CuAuII) и (CuAuII+A1). Для оценки соотношения фаз проведена математическая обработка рентгеновских пиков. Показано, что отжиг деформированного сплава при температуре 250°C приводит к аномальному росту микротвердости и прочности (выдержка в течение 12-24 часов повышает предел текучести до 1 ГПа) с одновременным снижением удельного электросопротивления. Обнаруженное явление объяснено с точки зрения замедления рекристаллизации в упорядоченном сплаве, что подтверждено высокой плотностью дислокаций в отожженных образцах.



На рисунке (б) схематически показаны элементы микроструктуры, которые формируются в предварительно деформированном сплаве в ходе атомного упорядочения: на фоне повышенной плотности дислокаций видны границы ламелей (показаны синим), внутри которых находятся *c*-домены (выделены красным), границы субзерен внутри *c*-доменов выделены желтым.

Рисунок - 1 – Микроструктура, сформировавшаяся в результате отжига 250°C, 1 неделя в деформированном сплаве Cu-56Au: а – светлопольное изображение и соответствующая микродифракция; б – схема, показывающая элементы микроструктуры на (а); г – темнопольное изображение в рефлексе (1) типа (111)_{Al+Li6}; д – темнопольное изображение в сверхструктурном рефлексе (2) типа (001)_{Li6}.

Публикации:

- [1. Annealing hardening of the pre-deformed Cu-56at.%Au alloy due to retardation of recrystallization by L10-type ordering](#) / A.Yu. Volkov, O.S. Novikova, E.G. Volkova, D.A. Komkova, P.O. Podgorbunskaya, A.A. Gavrilova, D.A. Zgibnev, A.V. Glukhov. – Текст: непосредственный // Materials Science and Engineering A. — 2024. — V. 900. — P. 146497—146505.
- [2. Формирование длиннопериодной упорядоченной фазы CuAuII в нестехиометрическом сплаве Cu-56at% Au](#) / О.С. Новикова, Е.Ф. Таланцев, П.О. Подгорбунская, А.Ю. Волков. – Текст: непосредственный // Физика твёрдого тела. — 2024. — V. 66. — P. 1662—1668.

3. Эволюция структуры и свойств сплава Cu-56Au (ат.%) в процессе атомного упорядочения по типу $L1_0$ / О.С. Новикова, Е.Г. Волкова, П.О. Подгорбунская, Д.А. Згибнев, А.А. Гаврилова, Н.А. Кругликов, А.Ю. Волков. – Текст: непосредственный // Физическая мезомеханика. — 2024. — V. 27. — №5 — P. 140—151.

4. Заявка на патент РФ №2024112421 от 07.05.2024. Способ термической обработки золотомедного сплава ЗлМ-80 для электрических скользящих контактов / А.Ю. Волков, О.С. Новикова, Е.Г. Волкова, Д.А. Комкова, П.О. Подгорбунская, А.А. Гаврилова, Д.А. Згибнев; заявитель ИФМ УрО РАН

Работа выполнена по теме «Давление».

Актуальность исследования: нестехиометрический сплав Cu-56ат. %Au выпускается промышленностью и под маркой ЗлМ-80 используется в приборостроении в атомно-упорядоченном состоянии. Поэтому поиск способов упрочнения этого сплава представляет научный и практический интерес.

Цель исследования: установить возможность использования наследованного дислокационного каркаса для существенного упрочнения упорядоченного сплава Cu-56Au.

Задачи исследования:

1) выяснить температурные интервалы формирования в исследуемом сплаве упорядоченных фаз CuAuI и CuAu; 2) исследовать кинетику превращения беспорядок→порядок, изучить формирование атомно-упорядоченной структуры и изменение свойств; 3) проанализировать взаимное влияние рекристаллизации и атомного упорядочения при отжиге исходно деформированного сплава.

Объект исследования: образцы сплава Cu-56Au, которые находятся в исходно разупорядоченном состоянии (A1-фаза).

Методы исследования: просвечивающая электронная микроскопия, рентгеноструктурный анализ; резистометрия; измерение микротвердости; механические испытания на растяжение.

Авторский вклад сотрудников ИФМ: идея исследования, постановка задачи, проведение расчёта, анализ результатов исследования, написание текста статей и заявки на патент.

1. Выявлены особенности формирования и установлен температурный интервал существования длиннопериодной CuAuII фазы в сплаве Cu-56Au.

Для проведения исследования исходно разупорядоченные образцы сплава Cu-56Au (ат.%) отжигались в температурном интервале от 250 до 375°C (с шагом 25°) в течение от 10 минут до 2 месяцев (Рис.2). Установлено, что однофазное, упорядоченное по типу CuAuI состояние формируется в исследуемом сплаве при температурах 250 и 275°C. При температуре 300°C сплав переходит в двухфазное (CuAuI+CuAuII) состояние. CuAuII-

фаза образуется при температурах 325 и 350°C. Отжиг при 375°C приводит к образованию двухфазной структуры беспорядок+порядок (A1+CuAuII). Установлено, что в процессе формирования длиннопериодной фазы CuAuII

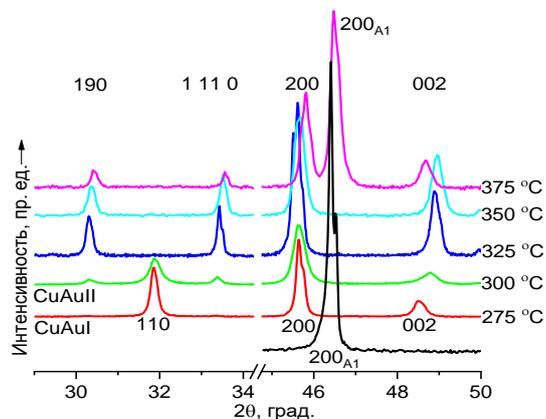


Рисунок - 2. Участки рентгеновских дифрактограмм в интервале углов 2θ от 29° до 50°, полученные после отжига предварительно закаленных образцов в течение 2 месяцев. Нижняя дифрактограмма соответствует исходному, разупорядоченному состоянию

сначала образуется сверхструктура CuAuI.

2. Изучена эволюция микроструктуры и изменение свойств сплава Cu-56Au в процессе атомного упорядочения.

В закаленном состоянии сплав имеет ГЦК разупорядоченную кристаллическую решетку с параметром: $a=0,3901$ нм. После отжига 250°C , 1 час наблюдаются начальные стадии превращения беспорядок→порядок: пики становятся более широкими, пик (200) смещается в сторону малых углов, а у его основания справа появляется «плечо». Через 24 часа отжига на месте этого «плеча» возникает пик (002) упорядоченной фазы. Формирование атомно-упорядоченной структуры завершается через 2 месяца отжига, образовавшаяся CuAuI-фаза имеет параметры: $a=0,3963$ нм, $c=0,3671$ нм. В полученном структурном состоянии степень дальнего атомного порядка (S) составляет: $S\approx 1$. Установлено, что формирование упорядоченной структуры повышает предел текучести исследуемого сплава в 1,5 раза, коэффициент деформационного упрочнения при этом увеличивается в 2 раза.

3. Обнаружено anomальное повышение прочностных свойств при отжиге деформированного сплава.

Показано (Рис.3), что отжиг предварительно деформированного сплава при температуре 250°C приводит к anomальному повышению микротвердости и предела текучести (на 30% и 15%, соответственно). Комплекс наиболее высоких свойств формируется через 24 часа отжига: предел текучести превышает 1 ГПа, удельное электросопротивление при этом понижается до: $\rho\approx 9.3\times 10^{-8}$ Ом·м. Обнаруженное явление объяснено с точки зрения замедления рекристаллизации в атомно-упорядоченной структуре: на Рис.3б хорошо видно, что пластичность сплава (кривая 2) на начальном этапе отжига практически не изменяется. Дислокационная плотность остается повышенной даже после 1 недели отжига (Рис.1).

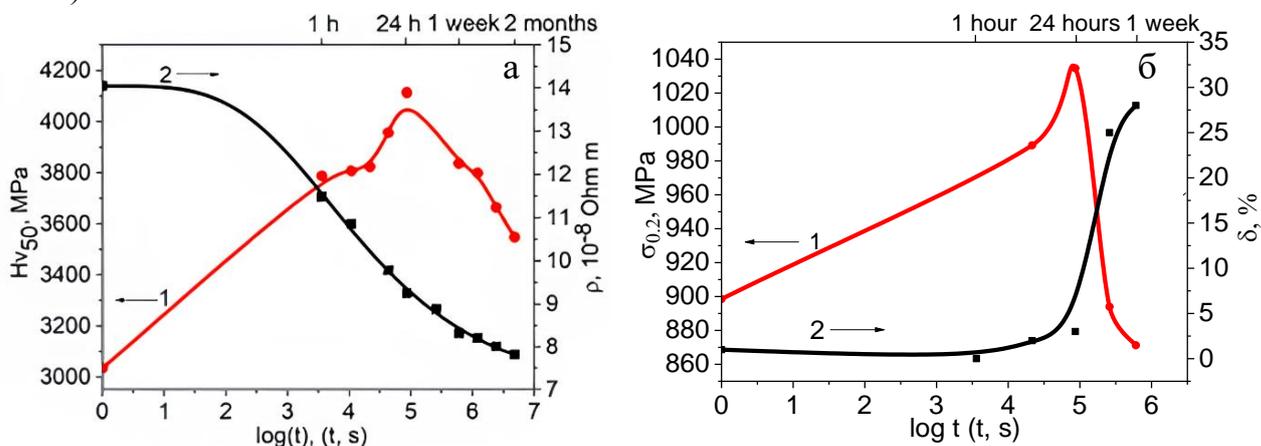


Рисунок – 4. Эволюция физико-механических свойств исходно деформированного сплава Cu-56Au в процессе отжига при 250°C : а - изменение микротвердости (1) и удельного электросопротивления (2); б - изменение предела текучести (1) и удлинения до разрыва (2).

Выводы:

Обнаружено, что в сплаве Cu-56(ат.%)Au граница между однофазной CuAuI структурой и двухфазным (CuAuI+CuAuII) состоянием лежит несколько выше 275°C , что не согласуется с общепринятой фазовой диаграммой.

Выявлено, что использовать эмпирическую взаимосвязь между пределом прочности σ_B и твердостью H в виде: $\sigma_B=H/\alpha$ (где α – коэффициент, величина которого, как правило, близка к 3) следует с осторожностью, учитывая возможное изменение фазового состава материала.

Разработан способ получения в атомно-упорядоченном сплаве Cu-56Au высокопрочного состояния (предел текучести выше 1 ГПа) с приемлемой пластичностью (удлинение до разрыва составляет 5-7%) и удельным электросопротивлением: $\rho \approx 9.3 \times 10^{-8}$ Ом·м.