ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

**МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«Перспективные материалы с иерархической структурой
для новых технологий и надежных конструкций»**

**X МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«Химия нефти и газа»**

Томск

Издательский Дом ТГУ

2018

DOI: 10.17223/9785946217408/27

ТЕРМИЧЕСКАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ ВТОРИЧНОЙ МЕДИ

Морозова А.И., Долженко А.С., Беляков А.Н.

*Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
Белгород, Россия*

Медь и ее сплавы являются наиболее перспективным материалом для электротехнического применения из-за хорошей электропроводности. Существуют значительные экологические и экономические преимущества для переработки меди в связи с низкой стоимостью медного лома и незначительными энергетическими затратами при производстве вторичного сырья, которые на 85-90 % ниже, чем при производстве меди из цельной руды. Одним из основных ограничений применения меди в электротехнике является ее недостаточная прочность. Упрочнение медных изделий может быть реализовано за счет деформационной обработки, такой как холодная прокатка. Пластическая деформация при комнатной температуре приводит к трансформации исходной микроструктуры, повышению плотности дислокаций, формированию дислокационных ячеек и субграниц дислокационного происхождения. Однако холоднодеформированная структура чистой меди может характеризоваться низкой термической стабильностью из-за развития процессов возврата и рекристаллизации даже при кратковременном нагреве до относительно невысоких температур (200-300 °С). Поэтому важно понять влияние отжига на разупрочнение вторичной меди и эволюцию микроструктуры.

Исследована медь вторичного производства, химический состав которой представлен в таблице 1.

Таблица 1. Химический состав вторичной меди.

Cu, мас. %	Zn, мас. %	Pb, мас. %	Fe, мас. %	Cr, мас. %
баланс	0,008	0,016	0,007	0,006

Медь была прокатана при комнатной температуры до истинной степени деформации $\epsilon=2,6$. Далее была проведена серия отжигов в интервале температур 200-500°С в течении 1 ч. Для оценки разупрочнения была измерена твердость методом Виккерса с использованием прибора WOLPERT 420 MVD. Исследования микроструктуры проводили с помощью растрового электронного микроскопа Nova NanoSEM 250, оснащенного приставкой для регистрации обратно-рассеянных электронов.

Рис. 1. Микроструктура меди после холодной прокатки (а) и отжигов при температуре 400 °С 1ч (б), при температуре 450 °С 1ч (в). Синие линии – границы с углом разориентировки <15°, черные – с углом разориентировки ≥15°, красные – специальные границы Σ3.

Средний размер зерен был определен методом секущих как расстояние между большеугловыми границами (БУГ) в поперечном направлении. Плотность дислокаций была определена с помощью соотношения Франка с использованием параметра среднего угла искажения решетки (kernel average misorientations) [1]. Среднее искажения решетки, доля БУГ, доля специальных границ Σ3, доля рекристаллизованных зерен (доля зерен с внутризеренным искажением (grain orientation spread) $\theta_{SPR}<1^\circ$), средний угол разориентировки границ θ были определены с помощью программного обеспечения OIM TSL. Оценку разупрочнения F_{HV} проводили по формуле [2]

Секция 1. Основные принципы и методология физической мезомеханики материалов с иерархической структурой

$$F_{HV} = (HV_{ХП} - HV_i) / (HV_{ХП} - HV_0) \quad (1),$$

где $HV_{ХП}$ – твердость меди после холодной прокатки, HV_i – твердость меди после текущего отжига, HV_0 – твердость полностью отожженной меди.

На рисунке 1 представлена микроструктура меди после холодной прокатки и отжига. Холодная прокатка приводит к вытягиванию зерен вдоль направления прокатки. При этом в структуре наблюдается большое число границ с углом разориентировки менее 15° (МУГ). Среднее расстояние между БУГ в поперечном направлении составляет 1 мкм. Отжиг при температуре 400 и 450 $^\circ\text{C}$ в течение 1 ч приводит к образованию и росту равноосных зерен средним размером 2,5-3 мкм. Практически отсутствуют МУГ, в структуре присутствуют двойники отжига.

Рис. 2 Влияние температуры отжига T на размер зерна D и плотность дислокаций ρ (а), долю большеугловых границ $F_{\text{БУГ}}$ и долю специальных границ $F_{\Sigma 3}$ (б), средний угол разориентировки границ θ и твердость HV (в), разупрочнение F_{HV} и долю рекристаллизованных зерен $F_{\text{РЕК}}$.

Изменение параметров микроструктуры иллюстрирует рисунок 2. С ростом температуры наблюдается тенденция к росту среднего размера зерна и падению плотности дислокаций. Доля большеугловых границ, составляющая примерно 60% после холодной деформации, растет в интервале температур 300-350 $^\circ$ и достигает насыщения при последующем росте температуры. Аналогичное поведение демонстрирует доля специальных границ $\Sigma 3$ и средний угол разориентировки границ. Отметим, что доля специальных границ при насыщении составляет около 50%, а средний угол разориентировки – 46-48 $^\circ$. Отжиг приводит к заметному падению твердости, что может быть следствием протекания возврата и рекристаллизационных процессов. Отметим, что изменение разупрочнения с ростом температуры деформации хорошо коррелирует с изменением доли рекристаллизованных зерен.

Вторичная медь показала невысокую термическую стабильность холоднодеформированной микроструктуры. Установлено, что рекристаллизационные процессы и разупрочнения в меди протекают после отжига при температуре 300 $^\circ\text{C}$ в течение 1 ч. После отжига при температуре 350 $^\circ\text{C}$ в течение 1 ч наблюдается полностью рекристаллизованная структура с размером зерна около 2-2,5 мкм и плотностью дислокаций порядка 10^{13} м^{-2} с твердостью около 60 HV.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства Образования и Науки РФ (Соглашение № 14.575.21.0135, идентификационный номер RFMEFI57517X0135). Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Технологии и материалы» ФГАОУ ВО НИУ «БелГУ».

Литература

1. Morozova A., Kaibyshev R. Grain refinement and strengthening of a Cu–0.1 Cr–0.06 Zr alloy subjected to equal channel angular pressing //Philosophical Magazine. 2017. №. 24. С. 2053-2076.
2. F. J. Humphreys, M. Hatherly, Recrystallization and related annealing phenomena, second ed., Elsevier, Oxford, 2012.