

Внутренние напряжения и их источники в технически чистой УМЗ-меди после интенсивной пластической деформации*

Н.А. Попова¹, Е.Л. Никоненко¹, Ю.В. Соловьева¹, В.А. Старенченко¹

¹ Томский государственный архитектурно-строительный университет, г. Томск, Россия

Методом просвечивающей дифракционной электронной микроскопии проведено исследование зеренной структуры внутренних напряжений и их источников в технически чистой ультрамелкозернистой меди, полученной в условиях интенсивной пластической деформации кручением под высоким давлением. Установлено, что интенсивная пластическая деформация кручением под высоким давлением привела к образованию в ультрамелкозернистой меди частиц вторичных фаз, обладающих нанометрическим размером и локализованных внутри, на границах и в стыках зерен. Выявлены источники внутренних напряжений и определена их амплитуда. Установлено, что источниками внутренних напряжений являются: стыки зерен, в которых присутствуют или отсутствуют частицы вторичных фаз; границы зерен, свободные от частиц вторичных фаз; частицы, расположенные на дислокациях внутри зерен, и, наконец, дислокационная структура. Установлено, что внутренние напряжения от всех источников охватывают все зерна независимо от их внутренней структуры и носят преимущественно упругий характер.

Ключевые слова: интенсивная пластическая деформация кручением под высоким давлением, ультрамелкозернистая медь, зерно, стык зерен, частица, кривизна-кручение кристаллической решетки, объемная доля, внутренние напряжения.

Введение

В настоящее время существует целый ряд методов интенсивной пластической деформации (ИПД) [1–7], приводящих к измельчению зерен. Одним из таких методов является интенсивная пластическая деформация кручением под высоким давлением (ИПДК) [1, 8–11]. Это метод, когда образец, имеющий форму тонкого диска, подвергается деформации кручением под высоким гидростатическим давлением [1]. Таким путем удается получать материалы с ультрамелким размером зерен (УМЗ). Известно, что отличие мелкозеренной структуры от фрагментированной состоит в том, что зерна, как правило, ограничены большеугловыми границами (угол разориентировки больше 6°), а фрагменты – малоугловыми границами (угол разориентировки меньше 6°) [12].

Известно также, что структура УМЗ-материалов может быть стабилизирована наноразмерными частицами вторых фаз, расположенными на границах и в стыках зерен [1, 13–16]. Расположенные на границах и в стыках зерен эти частицы препятствуют перемещению границ и тем самым участвуют в формировании УМЗ-структур [1, 13].

Однако УМЗ-материалы, полученные методом ИПД, обладают значительной избыточной энергией, локализованной в дефектной структуре границ зерен и фрагментов, в дислокационной структуре. Значительная часть избыточной энергии УМЗ-материала – это упругая энергия искажения кристаллической решетки [1, 15, 17, 18]. Исследование природы внутренних упругих напряжений УМЗ-материалов является важной задачей. Изучение и анализ внутренних упругих напряжений проводится различными методами. Однако при использовании большинства методов удается определить лишь интегральные характеристики, усредненные по всему объему образца. Поэтому к настоящему времени информация как об амплитуде внутренних напряжений, так и об их источниках остается незначительной. Эта задача наиболее полно решается методом просвечивающей электронной микроскопии.

Настоящая работа посвящена детальному исследованию внутренних напряжений и идентификации их источников в технически чистой УМЗ-меди, полученной методом ИПДК. Подчеркнем, что это описание является количественным и статистическим.

* Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FEMN-2023-0003).