

ВЛИЯНИЕ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА СТРУКТУРУ И СОСТОЯНИЕ ГРАНИЦ ЗЕРЕН В ГАФНИЕВОЙ БРОНЗЕ

Р. М. Фалахутдинов, В. В. Попов, Е. Н. Попова, С. А. Судакова

Институт физики металлов им. М. Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия

В современной электротехнической и атомной промышленности требуются материалы, сочетающие высокую прочность и электропроводность, и с этой точки зрения привлекательны низколегированные хромистые, циркониевые и хромоциркониевые бронзы. В настоящее время предпринимаются многочисленные попытки улучшать функциональные характеристики металлов и сплавов, применяя к ним различные экстремальные воздействия [1]. Выполнен большой объем исследований низколегированных бронз, подвергнутых интенсивной пластической деформации (ИПД) разными способами – кручением под высоким гидростатическим давлением (КВД), равноканальным угловым прессованием (РКУП) и динамическим канально-угловым прессованием (ДКУП) [2–4]. При всех способах ИПД достигается повышение прочностных характеристик. Легирование меди гафнием представляется весьма перспективным, поскольку Hf не только понижает энергию дефектов упаковки, но и может обеспечить дисперсионное упрочнение за счет образования выделений при последующем старении.

В работе [5] исследовали структуру и свойства закаленной бронзы после КВД на 5 оборотов, когда достигается стадия насыщения по измельчению структуры. В работе [6] исследовалась бронза, в которой КВД проводили после предварительного отжига, вследствие чего Hf в связанном состоянии, что исключало возможность дисперсионного упрочнения при последующем старении. Кроме того, в этих работах не изучалось состояние границ зерен (ГЗ) после КВД, в то время как во многих исследованиях показано, что ИПД металлических материалов приводит к формированию в них неравновесных (деформационно-модифицированных) границ зерен [7]. По мнению некоторых авторов, неравновесные ГЗ отвечают за повышенные свойства материалов, подвергнутых ИПД, которые превышают свойства, ожидаемые только за счет изменения размера зерен [8].

В настоящей работе методами электронной микроскопии, сканирующей туннельной микроскопии и измерения микротвердости изучена эволюция структуры закаленной гафниевой бронзы при КВД. Показано, что ИПД приводит к существенному упрочнению и измельчению структуры. Продемонстрировано, что значительная часть границ зерен имеют повышенную энергию, что свидетельствует об их неравновесном состоянии, причем количество таких границ увеличивается с увеличением степени деформации.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИФМ УрО РАН.

Литература

1. **Бродова, И. Г.** Фазово-структурные превращения и свойства цветных металлов и сплавов при экстремальных воздействиях [Текст] / И. Г. Бродова, В. И. Зельдович, И. В. Хомская // ФММ. – 2020. – Т. 121, № 7. – С. 696–730.
2. **Shangina, D. V.** Improvement of strength and conductivity in Cu-alloys with the application of high pressure torsion and subsequent heat-treatments [Text] / D. V. Shangina, J. Gubicza, E. Dodony et al. // J. Mater. Sci. – 2014. – Vol. 49. – P. 6674–6681.
3. **Wongsa-Ngam, J.** The development of hardness homogeneity in a Cu-Zr alloy processed by equal-channel angular pressing [Text] / J. Wongsa-Ngam, M. Kawasaki, T. G. Langdon // Mater. Sci. Eng. – 2012. – Vol. A 556. – P.526–532.
4. **Зельдович, В. И.** Механические свойства и структура хромоциркониевой бронзы после динамического канально-углового прессования и последующего старения [Текст] / В. И. Зельдович, С. В. Добаткин, Н. Ю. Фролова и др. // ФММ. – 2016. – Т. 117, № 1. – С. 74–82.
5. **Фалахутдинов, Р. М.** Влияние исходного состояния на эволюцию структуры гафниевой бронзы при старении [Текст] / Р. М. Фалахутдинов, В. В. Попов, Е. Н. Попова и др. // ФММ. – 2022. – Т. 123, № 9. – С. 962–970.

6. **Stolbovsky, A.** Effect of Hf Doping of Commercially Pure Copper on Evolution of its Microstructure under High Pressure Torsion [Text] / A. Stolbovsky, V. Popov, R. Falahutdinov // Solid State Phenomena. – 2020. – Vol. 299. – P. 424–429.
 7. **Nazarov, A. A.** Nonequilibrium grain boundaries in bulk nanostructured metals and their recovery under the influences of heating and cyclic deformation. Review [Text] // Letters on Materials. – 2018. – Vol. 8, No. 3. – P. 372–381.
 8. **Sauvage, X.** Grain boundaries in ultrafine grained materials processed by severe plastic deformation and related phenomena [Text] / X. Sauvage, G. Wilde, S. V. Divinski et al. // Mater. Sci. Eng. – 2012. – Vol. A 540. – P. 1–12.
-