

УДК: 621.771.23/.24:669.2

В. В. Мишин*, П. А. Глухов, И. А. Шишов

Санкт-Петербургский политехнический университет

Петра Великого, г. Санкт-Петербург

*m_v_v_m@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ БЕРИЛЛИЕВЫХ ФОЛЬГ ПРИ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКЕ И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ EBSD АНАЛИЗА

В работе при помощи методов *EBSD* анализа выполнены исследования эволюции структуры бериллиевых фольг при холодной прокатке и высоковакуумной термической обработке по различным режимам. Установлено, что для формирования мелкозернистой структуры бериллия в тонких фольгах и получения высокого уровня механических свойств необходимо использование больших суммарных деформаций при холодной прокатке в сочетании с кратковременными высоковакуумными отжигами. Увеличение суммарной степени деформации при холодной прокатке приводит к увеличению доли кристаллитов с благоприятной компонентой текстуры в фольге типа $\{0001\}\langle uvw \rangle$, которая способствует повышению пластических свойств за счет активации дополнительных небазисных систем скольжения при деформации.

Ключевые слова: бериллиевая фольга, *EBSD* анализ, кристаллографическая текстура, механические свойства, холодная прокатка.

V. V. Mishin, P. A. Glukhov, I. A. Shishov

INVESTIGATION OF STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES EVOLUTION FOR BERYLLIUM FOILS DURING COLD ROLLING AND HEAT TREATMENT USING EBSD ANALYSIS

Investigations of beryllium structure evolution during cold rolling and high-vacuum heat treatment by different regimes were performed in this work using EBSD analysis. It's established that combination of large total strain at cold rolling and short-term high-vacuum annealings is necessary to beryllium fine-grained microstructure formation in thin foils and the required complex of mechanical properties obtaining. The proportion of crystallites with favorable $\{0001\}\langle uvw \rangle$ type texture grows in foils as total strain at cold rolling increases. This promotes to plastic properties increase due to additional non—basic slip systems activation during deformation.

Key words: beryllium foil, *EBSD* analysis, crystallographic texture, mechanical properties, cold rolling.

Бериллий, благодаря высокой прозрачности для рентгеновского излучения, механической прочности и коррозионной стойкости, является одним из самых востребованных материалов для рентгеновского приборостроения [1]. Производство и эксплуатация тонких бериллиевых окон существенно ограничивается хрупкостью и низкой технологичностью бериллия [2]. В процессе эксплуатации детектора бериллиевое окно подвергается воздействию внешнего давления (статическому или циклическому) [3–4], поэтому наличие в фольге микротрещин и других дефектов, а также низкие прочностные и пластические свойства бериллия приводят сначала к потере вакуумной плотности фольги, а затем и к полному разрушению окна [4]. Разрушение бериллиевого окна приводит к выходу из строя детектора и остановке всего рентгеновского прибора.

Перспективным способом обеспечения требуемых характеристик бериллиевых фольг (высокие физико-механические свойства, вакуумная плотность, отсутствие поверхностных и внутренних дефектов, заданная шероховатость поверхности) является холодная прокатка в сочетании с высоковакуумными термическими обработками.

Целью работы является исследование влияния режимов холодной прокатки (ХП) и термической обработки (ТО) на структуру и механические свойства бериллиевых фольг различной толщины.

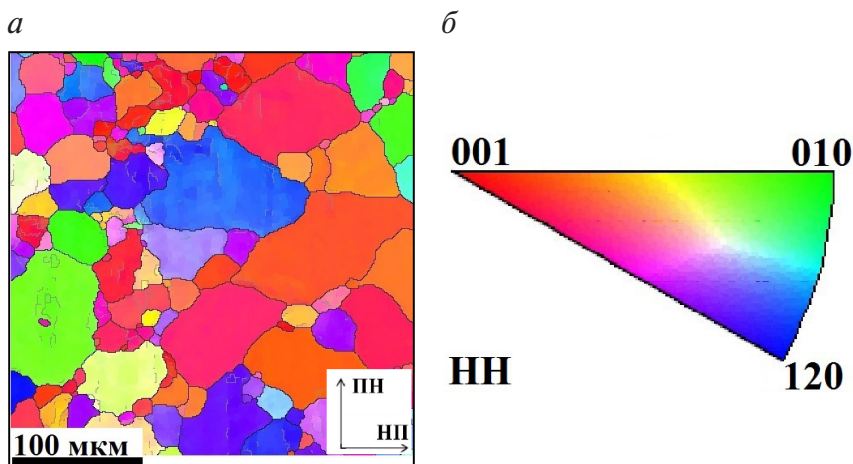


Рис. 1. Карта кристаллографических ориентировок в горячекатаном образце толщиной 330 мкм — *a*; стереографический треугольник для расшифровки *EBSD* карт — *б*

В качестве материала для исследований использовали дистиллированный бериллий чистотой 99,82 % (без учета BeO и Be_2C).

Исследование эволюции микроструктуры бериллиевых фольг после различных режимов обработки проводили методом дифракции отраженных электронов (*electron backscatter diffraction* — *EBSD*) на сканирующем электронном микроскопе (РЭМ) *Tescan Mira–3* с полевым катодом Шоттки, оборудованном приставкой для *EBSD* анализа *Nordlys* фирмы *HKL Oxford Instruments* с программным обеспечением *HKL Channel 5*. На рис. 1 представлена карта кристаллографических ориентировок в образце после горячей прокатки.

Микроструктура образцов в исходном горячекатаном состоянии характеризуется относительно крупным размером зерен, средний эквивалентный диаметр ($d_{\text{сред}}$) которых достигает 23 мкм. По *EBSD* карте (рис. 1), а также данным статистического анализа установлено, что в бериллии после горячей прокатки наблюдается существенная разнотернистость. Минимальный эквивалентный диаметр ($d_{\text{мин}}$) зерен в данном образце составляет 4 мкм; максимальный эквивалентный диаметр ($d_{\text{макс}}$) — 95 мкм. В некоторых горячекатаных образцах были обнаружены зерна с $d_{\text{макс}} = 120–130$ мкм.

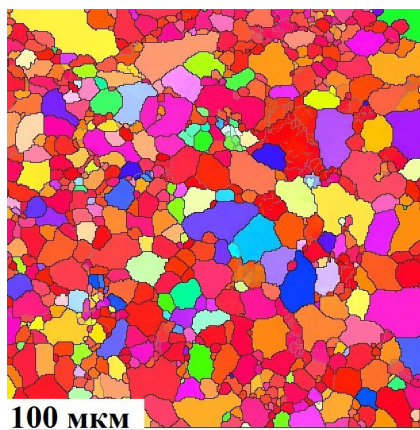


Рис. 2. Карта кристаллографических ориентировок в образце бериллиевой фольги толщиной 100 мкм после трех стадий холодной прокатки в сочетании с термическими обработками

На рис. 2 представлены результаты исследования структуры образцов после трех стадий холодной прокатки в сочетании с термическими обработками в вакууме горячекатаного состояния. По рис. 2 видно, что из исходной крупнозернистой структуры (см. рис. 1) формируется структура со средним эквивалентным диаметром зерен 12 мкм. При этом максимально обнаруживаемый диаметр составляет 47 мкм.

Выполненные механические испытания образцов на растяжение до разрушения показали, что благодаря использованию рассмотренных

режимов холодной прокатки и термической обработки удалось значительно увеличить прочностные и пластические свойства бериллиевых фольг по сравнению с исходным горячекатаным состоянием (рис. 3).

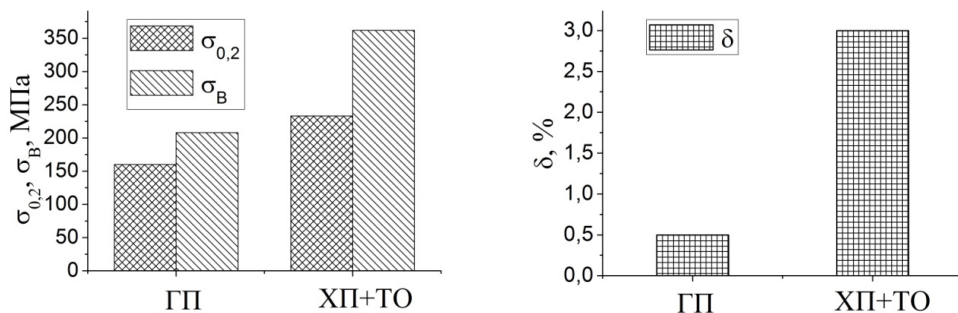


Рис. 3. Результаты механических испытаний бериллиевых фольг после горячей прокатки (ГП) и трех стадий холодной прокатки (ХП) в сочетании с термическими обработками (ТО)

Установлено, что увеличение степени деформации при холодной прокатке приводит к снижению величины разности зернистости и повышению доли кристаллитов, плоскость базиса которых ориентирована параллельно плоскости прокатки фольги.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации (соглашение № МК–1402.2017.8).

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Handbook of Practical X-Ray Fluorescence Analysis / В. Beckhoff [et al.] Berlin: Springer-Verlag, 2006.
- 2 Бериллий. Наука и технология / Г. Дж. Лондон [и др.] М.: Металлургия, 1984. 624 с.
- 3 Mishin V. V., Shishov I. A., Mincena A. Investigation of the Thin Beryllium Windows Fracture Probability under the External Cyclic Load // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2017. № 12. С. 7242–7249.
- 4 Mishin V. V., Shishov I. A. Investigation of deformation and fracture for thin beryllium // Mater.Phys.Mech. 2018. № 1. С. 100–113.