



О.В. Антонова<sup>1</sup>, Д.А. Комкова<sup>1</sup>, М.А. Токарев<sup>1</sup>, А.Л. Соколов<sup>1</sup>, Б.Д. Антонов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН,  
Ул. С. Ковалевской 18, Екатеринбург, 620108, Россия

<sup>2</sup> Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН,  
Ул. Академическая 20, Екатеринбург, 620041, Россия

## Введение

Магний и его сплавы широко используются в различных областях промышленности, в частности автомобильной и авиакосмической технике, благодаря хорошему сочетанию малой плотности и высокой удельной прочности. В настоящее время являются перспективными материалами особенно для областей медицины, биологических наночипов и т.д. Однако на сегодняшний день применение магниевых сплавов сильно ограничено из-за их плохой обрабатываемости и пластичности при комнатной температуре. Поэтому все работы, связанные с повышением этих свойств, представляют большой научный интерес [1,2]. Последнее десятилетие пристальное внимание к исследованию магния возникло в результате появления обработки методом интенсивной пластической деформации (ИПД), в частности равноканальное угловое прессование (РКУП). В лаборатории прочности ИФМ УрО РАН разработана методика, которая позволяет получать тонкостенные стаканчики из магния и его сплавов.

## Материал и методика исследования

В качестве материала для экспериментов был выбран слиток технического чистого магния (99,98%) марки МГ-90. Слиток имел столбчатую структуру со средним размером зерна 2,7 x 7,7 мм. Из центральной части слитка были вырезаны образцы цилиндрической формы диаметром 30 мм и высотой 40 мм. Деформация проводилась за одну операцию на гидравлическом прессе ДБ-2240 с усилием 10000 кН в специально разработанной оснастке методом поперечного выдавливания при комнатной температуре. На образец 2, помещенный в толстостенный контейнер 3, давит поршень 1. При этом, между поршнем и стенками контейнера имеется зазор, через который за счет передачи деформации на магниевый образец, происходит его обратное выдавливание в этот зазор, толщина которого может варьироваться в небольших пределах.



Рис. 1 - Гидравлический пресс марки ДБ-2240

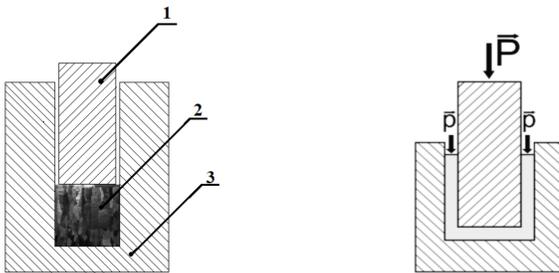


Рис. 2 - Схематическое изображение метода обратного выдавливания: 1) поршень, 2) магниевая заготовка, 3) стальной контейнер



Рис. 3 - Стаканчики, полученные в результате обратного выдавливания

Основной задачей настоящей работы являлось изучение структуры магния в исходном состоянии и после ИПД на тонкостенном стаканчике, толщина которого 1 мм. Использовались различные методы структурного анализа: 1) подробный рентгеноструктурный фазовый анализ, дифрактометр DMAX2000 компании RIGAKU в монохроматическом излучении  $\text{CuK}\alpha$  с разных участков поверхностей стаканчика; 2) методы сканирующей (СЭМ), Quanta 200 FEI, и просвечивающей (ПЭМ), JEM200Сх, электронной микроскопии. Для эволюции микроструктуры СЭМ- и ПЭМ-исследования проводились как для исходного образца из литого магния, так и после деформации со стенки стаканчика.

## Экспериментальная часть

Были получены дифрактограммы с трех участков дна стаканчика, начиная от центра к переходной области к поверхности стенки, а также со стенки стаканчика внизу, около переходной зоны, и в верхней ее части.

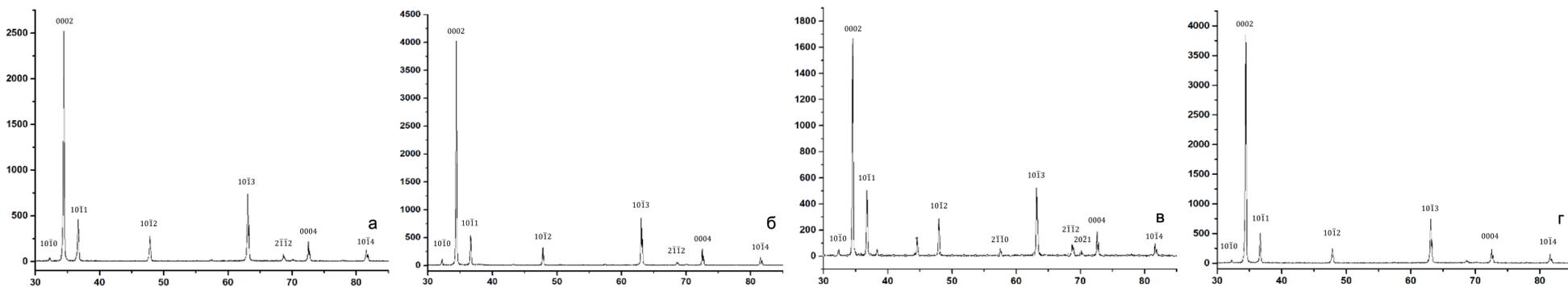


Рис. 4 - Дифрактограммы с разных участков стаканчика: а) с центра дна стаканчика; б) область перехода к стенке; в) нижняя часть стенки; г) верхняя часть.

Все дифрактограммы объединяет большая интенсивность пика (0002), что указывает на выраженную текстуру базиса, но его величина зависит от места съемки. Так, в центральной части дна стаканчика зафиксировали существенное ослабление текстуры базиса, интенсивность отражения от этих плоскостей уменьшилась почти в 3 раза по сравнению с исходным состоянием. В области перехода от дна стаканчика к стенке на дифрактограммах наблюдается усиление текстурного максимума со стороны дна (б) и его ослабление на поверхности стенки рядом с переходной зоной (в). В верхней части стаканчика имеет место дифрактограмма (г), практически совпадающая с приведенной для участка (б).

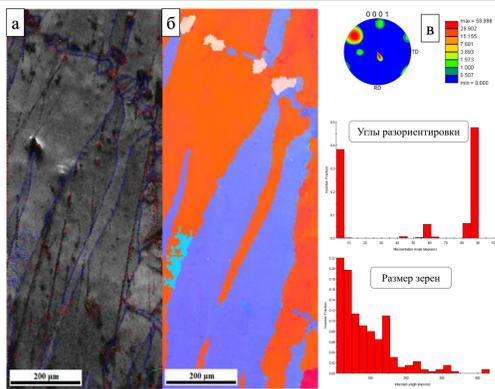


Рис. 6 - СЭМ изображение микроструктуры магния в: а) исходное литое состояние; б) EBSD-карта с участка (а); в) прямая полюсная фигура (0001) и гистограммы распределения по углам разориентации и размерам зерен

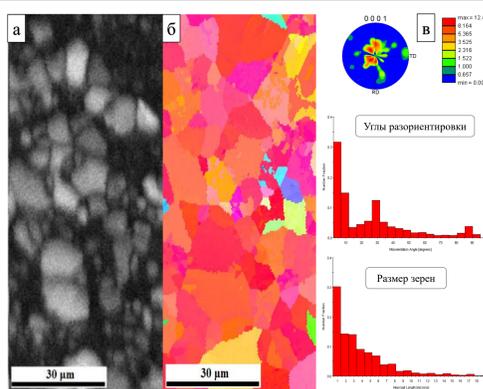


Рис. 7 - СЭМ изображение микроструктуры магния а) после деформации на  $e \sim 2,7$  (стенка стаканчика); б) EBSD-карта с участка (а); в) прямая полюсная фигура (0001) и гистограммы распределения по углам разориентации и размерам зерен

Сравнение микроструктуры по картам EBSD в литом и деформированном состоянии показало наличие в структуре двойников, плотность которых после деформации существенно уменьшилась. Это подтверждается полученными гистограммами распределения углов разориентировки между зернами. В литом образце наблюдается пик разориентировки в диапазоне  $85^\circ - 90^\circ$ , что указывает на наличие двойников  $\{10\bar{1}2\}$ . После деформации этот пик в данном диапазоне уменьшился. В соответствии с гистограммами распределения зерен по размерам, их величина находится в диапазоне от 0,1 мкм до 5 мкм. То есть наблюдается существенное уменьшение размеров зерна по сравнению с исходным состоянием, по крайней мере, на три порядка.

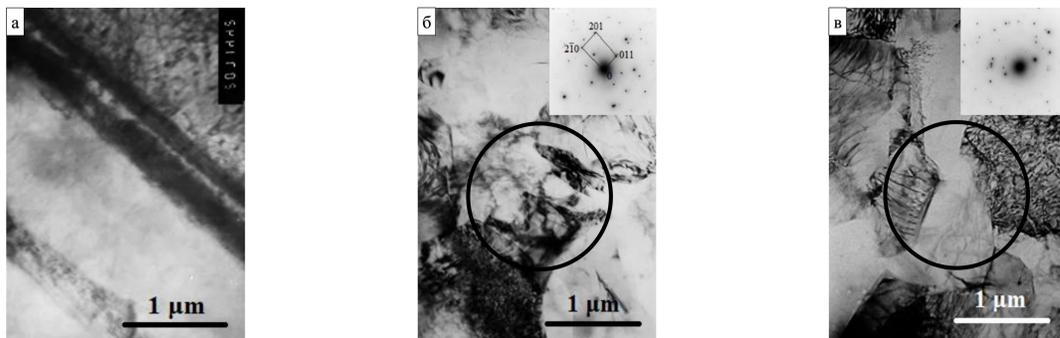


Рис. 8 - ПЭМ изображения (в светлом поле) микроструктуры магния: а) исходное состояние микроструктуры; б, в) после деформации (стенка стаканчика)

Для литого состояния характерна полосовая микроструктура, которая в большинстве случаев имеет двойниковое происхождение. На некоторых участках наблюдается дислокационные сплетения и петли, которые, скорее всего, сформировались в процессе кристаллизации слитка.

Микроструктура магния после деформации отличается от исходной (б,в). Если в исходном состоянии границы зерен не были обнаружены, то после деформации наблюдали зерна, размеры которых варьируются в пределах от 1 до 2 мкм. Довольно часто встречаются зерна более мелкого размера  $\sim 0,5$  мкм. Все эти зерна по отношению друг к другу имеют большеугловые границы, на что указывают вид дифракций с выделенных участков, которые являются суперпозицией выходов нескольких осей зон. В зернах наблюдается высокая плотность дислокаций.

## Выводы

- использованный метод деформации литого образца оказался успешным для получения тонкостенных стаканчиков с толщиной стенки 1 мм при комнатной температуре за одну операцию, которые в дальнейшем могут быть использованы для получения фольг (по предварительным результатам до толщины  $\sim 30$  мкм);
- по данным рентгеноструктурного анализа, магний после ИПД обладает существенно ослабленной текстурой базиса по сравнению с исходным состоянием, что подтверждается наличием достаточно большого количества пиков. Этот факт может благоприятно сказаться на дальнейшей деформации;
- методы сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии наглядно показали изменение величины зерна от 3 мм в диаметре в исходном состоянии до единиц микрон (1 - 2 мкм), после деформации на поверхности стаканчика в некоторых областях наблюдались колонии зерен размером 0,1 - 0,5 мкм.

## Список источников

- М.Б. Альтман. Металловедение магния и его сплавов - М.: Металлургия (1978).
- K.U. Kainer. Magnesium Alloys and Technology (2003).