

DOI: 10.15593/perm.mech/2014.3.07

УДК 539.3

Н.Е. Скрыбина¹, В.Н. Аптуков¹, П.В. Романов¹, Д. Фрушар²¹Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия²Институт Нееля, Гренобль, Франция

ВЛИЯНИЕ РАВНОКАНАЛЬНОГО УГЛОВОГО ПРЕССОВАНИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И МИКРОСТРУКТУРУ ОБРАЗЦОВ МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Подготовка материалов для насыщения водородом в качестве первичной обработки сводится к его измельчению. Это позволяет существенно улучшить кинетические параметры сорбции/десорбции водорода за счет увеличения удельной доли поверхности в образце. Эффективность измельчения зависит от механических характеристик материала.

В работе исследованы механические характеристики образцов из магния и магниевых сплавов AZ31 и ZK60 до и после деформации равноканальным угловым прессованием (РКУП). Показано, что деформация РКУП приводит к анизотропии механических свойств, а также увеличению прочности, предела текучести и уменьшению модуля упругости. Проанализированы возможные микромеханизмы реализации пластической деформации. Показано, что деформация РКУП создает текстуру в материале, формирование которой приводит к появлению анизотропии механических свойств.

Установлено, что интенсивная пластическая деформация РКУП в исследованных материалах осуществляется преимущественно скольжением по базисным плоскостям, что характерно для кристаллов с гексагональной плотнейшей упаковкой с отношением параметров элементарной ячейки, близким к идеальному ($c/a \sim 1,63$). Вторым вкладом (по величине и значимости) в развитие деформации является двойникование. Расчет текстуры, сформированной в ходе деформации РКУП, показал, что в сплавах на основе магния двойникование реализуется по плоскости $\{10-12\}$ в направлении сдвига $\langle -1011 \rangle$. Возникновение двойников препятствует вовлечению в процесс деформации иных систем скольжения, а именно скольжения по пирамидальным и призматическим плоскостям кристаллической решетки.

Проведенный в работе анализ деформационного поведения магния и его сплавов может быть положен в основу технологии создания материалов с ультрадисперсной структурой для хранения водорода в виде обратимых гидридов.

Ключевые слова: равноканальное угловое прессование, магниевые сплавы, механические характеристики образцов, анизотропия свойств, микроструктура, дислокация, двойники.

N.E. Skryabina¹, V.N. Aptukov¹, P.V. Romanov¹, D. Fruchart²

¹Perm State National Research University, Perm, Russian Federation

²Institut Néel, Grenoble, France

IMPACT OF EQUAL-CHANNEL ANGULAR PRESSING ON MECHANICAL BEHAVIOR AND MICROSTRUCTURE OF MAGNESIUM ALLOYS

Preparation of materials for hydrogen saturation as a primary treatment involves its refinement. This allows improving the kinetic parameters of sorption / desorption of hydrogen by increasing the proportion of the specific surface of the sample. The efficiency of particle size reduction depends on the mechanical characteristics of the material.

We studied the mechanical properties of samples of magnesium and magnesium alloys AZ31 and ZK60 before and after deformation with equal channel angular pressing (ECAP). It is shown that results in deformation of the ECAP are: anisotropy of mechanical properties appearance as well as increased strength, yield strength and modulus decrease. The possible mechanisms for the implementation of microplastic deformation were discussed. It was shown that the ECAP deformation creates the texture in material which lead to anisotropy of mechanical properties.

It was found that in the investigated materials, severe plastic deformation, as for example ECAP, is carried out mainly by sliding along the basal planes, which is typical for crystals with hexagonal close packing with the ratio of the lattice parameters close to ideal ($c/a \sim 1.63$). The second contribution (in magnitude and significance) on the deformation is twinning. Calculation texture formed during ECAP deformation showed that in alloys based on magnesium twinning implemented on the $\{10\text{-}12\}$ planes in the direction of shear $\langle -1011 \rangle$. This one prevents the occurrence in the deformation process involving other slip systems, namely, sliding on prismatic and pyramidal planes of the crystal lattice.

The analysis of the deformation behavior of magnesium and its alloys can be used as the basis for creation of the technology of materials with ultra fine structure for hydrogen storage based on the reversible hydrides.

Keywords: equal-channel angular pressing, magnesium alloys, the mechanical properties of the samples, the anisotropy of properties, microstructure, dislocation, twins.

Введение

Магниеые сплавы известны как легкие конструкционные материалы, которые применяются в аэрокосмической и автомобильной промышленности. Повышенный интерес к сплавам связан с их высокими удельными прочностными характеристиками, что делает их перспективными для использования в качестве корпуса для небольших переносных устройств, таких как сотовые телефоны, корпуса для ноутбуков, компонентов для автомобилей и т.д. В настоящее время интерес к этим материалам обусловлен еще и тем, что гидриды магния являются оптимальными сплавами для хранения водорода с точки зрения эффективности и безопасности. Магний и сплавы на его основе способны обратимо поглощать водород в количестве, удовлетворяющем требо-

ванию DOE [1]. Подготовка материалов для насыщения водородом, как правило, сводится к измельчению их структуры путем интенсивной пластической деформации (ИПД). Это позволяет значительно улучшить кинетику реакции сорбции/десорбции водорода за счет увеличения удельной доли поверхностей раздела в образце. Повышения сорбционных характеристик магниевых сплавов можно достичь, используя равноканальное угловое прессование (РКУП) [2,3]. В ходе РКУП происходит изменение микроструктуры, которое сопровождается не только фрагментацией материала, но и образованием ярко выраженной текстуры [4].

Метод равноканального углового прессования применяется для получения высокоплотных наноструктурированных материалов с высокой однородностью зерна из пластически деформируемых образцов [2]. Интенсивная сдвиговая деформация образца происходит при пересечении им области сопряжения между каналами, как правило, одинаковыми по размеру, но соединенными под некоторым углом. При использовании этого метода существует несколько требований для получения объемных наноматериалов. Важное значение имеет формирование ультрамелкозернистых структур, имеющих большеугловые границы зерен, поскольку именно в этом случае качественно изменяются свойства материалов. Кроме того, требуется формирование наноструктур, однородных по всему объему образца, что необходимо для обеспечения стабильности свойств полученных материалов. Целью данной работы явилось изучение влияния ИПД на микроструктуру и механическую стабильность сплавов на основе магния.

1. Материалы и методики исследования

Изучены три типа материала: чистый магний (99,99 вес.% Mg), сплав AZ31 (96 % Mg, 3% Al, 1% Zn, вес.%) и сплав ZK60 (94 % Mg, 5,5 % Zn, 0,5 % Zr, вес.%). Заготовки в состоянии поставки имели форму параллелепипедов размером 10×10×50 мм (рис. 1). Образцы для проведения фазового анализа (дифрактометр Siemens D5000R, λ_{α} – Co), исследований текстуры (текстурный дифрактометр Siemens D5000T, λ_{α} – Cu, радиальный угол изменяли от 0 до 90°, а азимутальный угол – в интервале от 0 до 360° с шагом 5°) и металлографических исследований структуры (оптический микроскоп Olympus BX51) представляли собой квадратные пластинки толщиной 2 мм, вырезанные перпендику-

лярно длинной оси заготовки металла или сплава. Для механических испытаний на сжатие из каждой заготовки исходного материала был вырезан образец в форме куба размером $10 \times 10 \times 10$ мм. Выбор формы был обусловлен необходимостью изучения анизотропии поведения материалов, деформированных равноканальным угловым прессованием. Механические испытания проводили на универсальной испытательной машине Zwick/Roell Z-250 с максимальным усилием 250 кН в режиме одноосного сжатия с постоянной скоростью перемещения траверсы 10 мм/мин.

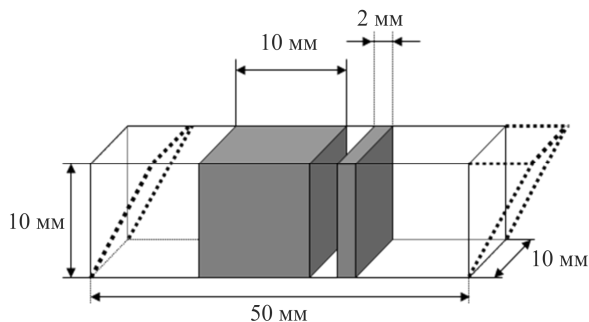


Рис. 1. Схема вырезания образца для механических испытаний (куб) и микроструктурных исследований (пластина) из заготовок до и после деформации РКУП (торцы деформированной заготовки показаны пунктиром)

Сжатие исходного прямоугольного образца осуществляли вдоль оси (длины) заготовки. Сжатие образца, вырезанного из деформированной одним проходом РКУП заготовки, осуществляли в двух направлениях: вдоль оси канала РКУП (тип А) и вдоль плоскостей сдвига (тип Б). На рис. 2 показаны схемы испытания образцов: маленькие стрелки указывают направление перемещения образца по каналу, большие – направление сжатия при механических испытаниях.

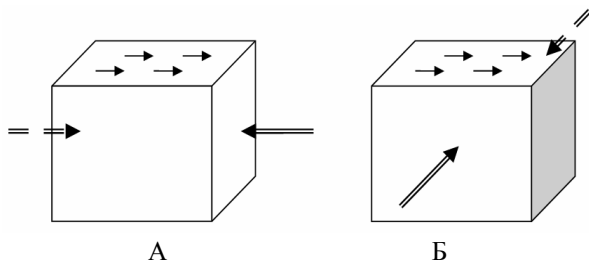


Рис. 2. Схемы испытания образцов на сжатие после деформации РКУП

Подготовка образцов к рентгеноструктурным и металлографическим исследованиям заключалась в следующем. Каждую пластинку шлифовали на наждачной бумаге с уменьшением размера зерна до 20 мкм, добиваясь плоскопараллельной ориентации исследуемой поверхности по отношению к плоскости горизонтальной опоры. Затем производили полировку на шлифовальном станке с применением фетра и алмазной пасты. После этого каждый образец тщательно очищали от остатков абразива, отполированную поверхность обезжировали спиртом. Для выявления отдельных элементов микроструктуры на шлифах магния и его сплавов использовали реактивы [5]. После травления образцы промывали дистиллированной водой и сушили в этиловом спирте.

Операцию РКУП осуществляли в матрице с углом сопряжения каналов 105° , скорость движения пуансона 3 см/с, температура образца при деформировании 200°C .

2. Результаты и обсуждение

На рис. 3 показаны типичные диаграммы сжатия образцов магния, сплавов AZ31 и ZK60 до и после деформации РКУП. Результаты испытаний сводятся к следующему.

Материал Mg. После деформации РКУП заметно упрочнился: в 5,7 раза увеличился предел текучести, в 1,5 – предел прочности. Предельная деформация практически не изменилась. При сжатии вдоль плоскостей сдвига произошло хрупкое (динамическое) разрушение образца.

Сплав AZ31. После деформации РКУП в 2,7–2,8 раза вырос предел текучести, в 1,2–1,4 раза – предел прочности. Предельная деформация незначительно уменьшилась. Разрушение образца динамическое, сопровождается сильным хлопком. Анизотропия свойств: предел прочности вдоль слоев (тип Б) превышает предел прочности вдоль канала (тип А) на 21 %, а предельная деформация меньше на 13 %.

Сплав ZK60. После деформации РКУП: в 1,7 раза вырос предел текучести, предел прочности уменьшился на 13 % (тип А) и увеличился на 20 % (тип Б). Предельная деформация уменьшилась на 31 % (тип А) и осталась на прежнем уровне (тип Б). Разрушение образца динамическое, сопровождается сильным хлопком. Анизотропия свойств: предел прочности вдоль слоев (тип Б) превышает предел прочности вдоль канала (тип А) на 39 %, а предельная деформация на 44 %.

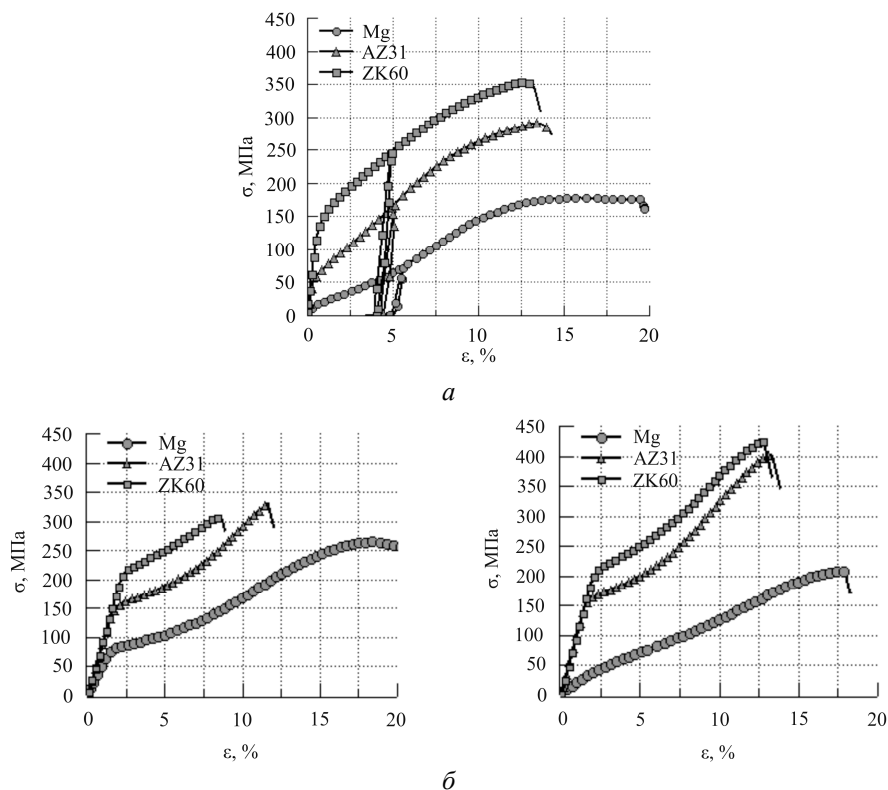


Рис. 3. Диаграммы сжатия для образцов магния и его сплавов AZ31 и ZK60 после одного цикла деформации РКУП: *а* – в исходном состоянии; *б* – схемы испытаний на сжатие (см. рис. 2)

Для обоих сплавов AZ31 и ZK60 после первого прохода РКУП наблюдается значительное снижение модуля упругости (гистерезиса), в 2,5–2,9 раз. Установлено, что анизотропия свойств, обусловленная схемой испытания образцов (А или Б) после однократной деформации РКУП, наиболее сильно проявляется в сплаве ZK60.

Увеличение значений условных пределов текучести в сплавах AZ31 и ZK60 по сравнению с магнием объясняется тем, что помимо собственного чистым металлам субструктурного и поликристаллического деформационного упрочнения в сплавах реализуются механизмы твердорастворного и (или) твердофазного упрочнения, обусловленные введением в магний легирующих элементов.

Согласно диаграмме состояния [6] при концентрациях алюминия более 2 вес. % система Mg-Al обычно представлена двумя фазами – твердым раствором на базе магния и интерметаллическим соединени-

ем $Mg_{17}Al_{12}$, которое кристаллизуется в объемно-центрированную кубическую структуру с периодом решетки $a = 10,5 \text{ \AA}$ [7]. Стоит отметить, что атомы Zn могут замещать атомы Al в указанном соединении [8–9], однако формирование самостоятельной фазы на базе Mg и Zn маловероятно, поскольку номинальная концентрация Zn в сплаве, составляющая около 1 вес. %, не превышает предел растворимости в 1,4 вес. % [10]. Результаты рентгеновского фазового анализа показали, что на дифрактограмме отсутствуют рефлексы, свидетельствующие о наличии в образце сплава AZ31 интерметаллической фазы, которая, если и имеется, то ее содержание настолько мало, что оказывается ниже чувствительности рентгеновского метода. Таким образом, можно считать, что состав сплава AZ31 представлен преимущественно твердым раствором легирующих компонентов в магнии.

На дифрактограмме образца сплава ZK60 помимо рефлексов от основной фазы (магний или $Mg(Zn)$) присутствуют реперные линии фазы $MgZn_2$. В соответствии с диаграммой состояния [10] в системе Mg-Zn-Zr при охлаждении из расплава в первую очередь кристаллизуется соединение $MgZn_2$ или $(Mg,Zr)Zn_2$, имеющее гексагональную плотноупакованную структуру с параметрами ячейки $a = 5,15 \text{ \AA}$ и $c = 8,50 \text{ \AA}$ [11]. Расчеты показали, что упомянутые выше реперные линии соответствуют отражениям от атомных плоскостей указанного вещества с индексами 201 и 202.

Таким образом, очевидно, что в сплаве AZ31 в процессе сжатия твердорастворное упрочнение может оказаться одним из ведущих механизмов упрочнения. Для сплава ZK60 характерно твердофазное упрочнение ввиду наличия в его структуре мелкодисперсных интерметаллических выделений, которые сохраняются в сплаве и после его нагрева до температуры деформации РКУП 200 °С. Кроме того, упрочняющая фаза может способствовать размножению взаимодействующих с ней дислокаций, в то же время она обычно противодействует развитию процессов дислокационного упорядочения при фрагментации [13], которая охватывает тело зерна, распространяясь, как правило, от его первоначальных границ. Другим возможным механизмом упрочнения может быть увеличение количества большеугловых границ в процессе деформации.

Размер зерна магния, сплавов AZ31 и ZK60
до и после деформации РКУП при температуре 200 °С

	Магний	AZ31	ZK60
Исходный	(529 ± 28) мкм	(28 ± 5) мкм	(18 ± 7) мкм
Деформация РКУП	(8 ± 1) мкм	(3,1 ± 1,0) мкм	(2,8 ± 0,9) мкм

Из данных, приведенных в таблице, видно, что размер зерна в исследуемых материалах уменьшается в ряду: магний, сплав AZ31, сплав ZK60 как для исходных, так и для деформированных материалов. Иными словами, уменьшение размера зерна также может вносить свой вклад в увеличение деформационных пределов сплавов по сравнению с чистым магнием.

Таким образом, представляется ясным закономерное изменение деформационного поведения и его отличия для магния и его сплавов (см. рис. 3) в ряду магний – сплав AZ31 – сплав ZK60. Однако приведенные факты не объясняют существование анизотропии на диаграммах сжатия. Причина анизотропии, проявляющейся при сжатии образцов, заключается, по-видимому, в следующем.

Анализ профилей кривых «напряжение-деформация» магния и его сплавов, полученных после деформации равноканальным угловым прессованием, показал, что их форма типична для монокристаллов [12]. В поликристаллических образцах это может свидетельствовать о наличии в каждом из деформируемых сплавов текстуры. Идентичный характер деформационного поведения сплавов, анизотропия свойств, а также стадийность параболического упрочнения, видимого на графиках, указывают на однотипный характер и преимущественную ориентировку зерен, по крайней мере связанную с реализацией пластической деформации.

Известно [12], что пластическая деформация магния осуществляется двумя возможными механизмами: скольжением дислокаций и двойникованием. В отличие от кристаллов кубической сингонии в гексагональных кристаллах число систем скольжения меньше, и они существенно неравноправны. Кроме того, иерархия «подключения» определенной системы скольжения к деформационному процессу зависит от соотношения c/a кристалла (c – параметр элементарной ячейки вдоль направления [001], a – параметр элементарной ячейки вдоль направления [100]) и от температуры испытания [13]. Исследования последних лет [14] свидетельствуют о том, что перемещение дислока-

ций в гексагональной плотнейшей упаковке магния и его сплавов может происходить в определенных атомных плоскостях.

Системы скольжения $\langle a \rangle$ типа соответствуют направлению $\langle -12-10 \rangle$ движения дислокаций в базисной $\{0002\}$, призматической $\{10-10\}$ и пирамидальной $\{10-11\}$ плоскостях. Системы скольжения $\langle c + a \rangle$ типа соответствуют направлению $\langle -12-13 \rangle$ движения дислокаций в плоскости пирамиды второго рода. Действующим механизмом деформации также является двойникование [15], которое происходит по плоскости $\{10-12\}$ в направлении сдвига $\langle -1011 \rangle$ либо по плоскости $\{10-11\}$ в направлении $\langle 10-1-2 \rangle$.

Рентгенографические исследования текстуры в магнии и сплавах показали, что на полюсных фигурах присутствует два максимума с разной интенсивностью (рис. 4). Это обстоятельство указывает на то, что формирование преимущественных ориентировок в процессе деформации РКУП происходило за счет вовлечения двух механизмов, доля которых пропорциональна интенсивности соответствующей ориентировки. Расчеты показали, что наиболее интенсивный текстурный максимум соответствует отражениям от плоскостей базиса $\{0002\}$. Следовательно, пластическая деформация в исследованных нами материалах главным образом осуществлялась за счет базисного скольжения дислокаций. Однако представляется, что возникновение дополнительной текстурной компоненты связано именно с самосогласованным действием базисной и какой-либо вторичной системы скольжения либо двойникования. Экстремумов, близких по интенсивности к базисным ориентировкам на полюсных фигурах (100), (101) и (110), не обнаруживается, а угол между центрами текстурных максимумов составляет $\sim 37^\circ$. Это является типичным признаком текстуры, возникающей в результате вторичного двойникования – последовательно по системам $\{10-11\}\langle 10-1-2 \rangle$ и $\{10-12\}\langle -1011 \rangle$ [13, 16].

Системы двойникования в зернах с ориентировкой (012)[101] характеризуются практически вторым по величине фактором Шмида $\mu = 0,19 \dots 0,23$ [17] и в то же время значительно меньшим значением критических касательных напряжений при комнатной температуре по сравнению с призматическими и пирамидальными системами скольжения [13]. Характерные двойники наблюдаются в микроструктуре деформированного сплава ZK60 (рис. 5).

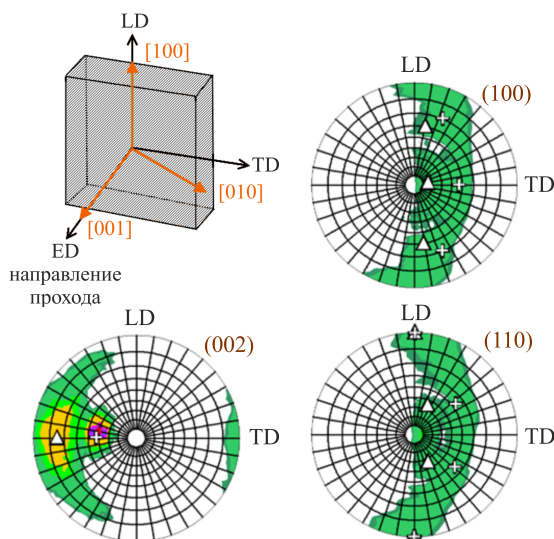


Рис. 4. Полусные фигуры для образца сплава AZ31 после однократной деформации РКУП ($T = 293$ К). Знаком + показан текстурный максимум, сформированный в результате базисного скольжения дислокаций, знаком Δ показан текстурный максимум, сформированный в процессе двойникования

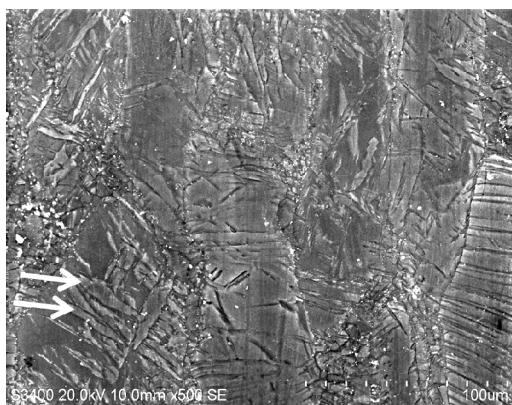


Рис. 5. Микроструктура сплава ZK60 после однократной деформации РКУП при комнатной температуре. Стрелками на рисунке показаны двойники деформации

Как видно из рис. 5, в плоскости шлифа образец состоит из сравнительно крупных первичных зерен, частично фрагментированных в процессе деформации. Двойникование является первичным механизмом измельчения наиболее крупных зерен, по мере дробления которых, однако, повышаются и критические напряжения старта двойникового источника.

Перечисленные обстоятельства позволяют рассматривать двойникование как предпочтительный механизм деформации перед скольжением в небазисных плоскостях. Более того, образовавшиеся двойники, по-видимому, создают дополнительные препятствия для перемещения дислокаций во вторичных системах скольжения.

Текстура в магнии и сплавах, сформированная в процессе деформации РКУП, характеризуется тем, что направление c в элементарных ячейках материалов стремится занять положение по оси канала матрицы. Двойникование, в основе которого заложены строгие кристаллографические соотношения, осуществляется по определенным направлениям, которые зависят от направления приложения силы и существующих полей напряжений. Так, если кристалл сжимать перпендикулярно оси c , двойники будут вызывать растягивающие напряжения вдоль оси c . Напротив, сжатие вдоль оси c будет приводить к тому, что вдоль оси c будут возникать сжимающие напряжения [13]. Таким образом, на наш взгляд, становится ясен микромеханизм, ответственный за появление анизотропии в экспериментах, представленных на рис. 3. В процессе деформации РКУП в образце формируется текстура деформации. В процессе механических испытаний сжатием по схеме А происходит суммирование напряжений, вызванных сжатием, и возникающих напряжений сжатия от вновь образованных или уже существующих двойников в структуре материала. Если механические испытания осуществляются по схеме Б, а в этом случае происходит нагрузка образца перпендикулярно оси канала матрицы РКУП, двойники в структуре образца вызывают растягивающие напряжения, что приводит к частичной релаксации внутренних напряжений и, по-видимому, способствует механической устойчивости материала.

Из представленных результатов следует, что при деформации равноканальным угловым прессованием эффективно действуют как дислокационные механизмы измельчения микроструктуры, так и двойникование, которые реализуются в сплавах на основе магния. Двойники создают ориентированные поля напряжений, которые обуславливают анизотропию внутренних напряжений и приводят в конечном счете к проявлению анизотропии свойств при механических испытаниях (схема А и Б при сжатии).

Выводы

Показано, что однократная деформация РКУП при комнатной температуре магния и его сплавов (на примере AZ31 и ZK60)

– приводит к увеличению прочности, предела текучести и уменьшению модуля упругости;

– приводит к появлению анизотропии механических свойств в испытаниях на сжатие;

– реализуется посредством двух механизмов: дислокационным скольжением по базисным плоскостям и двойникованием. В данных условиях деформации двойникование оказывается предпочтительным по сравнению со скольжением по пирамидальным и призматическим системам скольжения. Появление двойников деформации вносит свой вклад в характер распределения внутренних напряжений и обуславливает появление анизотропии механических свойств исследованных материалов в испытаниях на сжатие.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования Пермского края, проект № С-26/211.

Библиографический список

1. Тарасов Б.П., Лотоцкий М.В., Яртысь В.А. Проблема хранения водорода и перспективы использования гидридов для аккумулирования водорода // Рос. хим. журн. – 2006. – Т. 1, № 6. – С. 34–48.

2. Формирование текстуры деформации в сплаве AZ31 под воздействием равноканального углового прессования / Н.Е. Скрябина, Д. Фрушар, Г. Жирард, С. Мираглия // Вестник Пермского университета. Физика. – 2010. – № 1. – С. 97–101.

3. Valiev R.Z., Langdon T.G. Principles of equal channel angular pressing as a processing tool for grain refinement // Prog. In Mater. Sci. – 2006. – Vol. 51. – P. 881–981.

4. Equal Channel Angular Pressing (ECAP), a severe plastic deformation (SPD) technique to promote fast hydrogen absorption in mg alloys / G. Girard, D. Fruchart, S. Miraglia [et al.] // Metal Hydrogen Systems: Proc. Inter. Sympos. – Moscow, 2010. – P. 141.

5. Пшеничников Ю.П. Выявление тонкой структуры кристаллов. – М.: Металлургия, 1974. – 528 с.

6. Диаграммы состояния двойных металлических систем: справочник: в 3 т. Т. 1 / под ред. Н.П. Лякишева. – М.: Машиностроение, 1996. – С. 167–170.

7. Celotto S., Bastow T.J. Study Of Precipitation In Aged Binary Mg–Al And Ternary Mg–Al–Zn Alloys Using ^{27}Al NMR Spectroscopy // *Acta Materialia*. – 2001. – Vol. 49. – P. 41–51.

8. Microstructure and texture of twin-roll cast Mg–3Al–1Zn–0.2Mn magnesium alloy / N. Tang, M.P. Wang, H.F. Lou, Y.Y. Zhao, Z. Li // *Materials Chemistry and Physics*. – 2009. – Vol. 116. – P. 11–15.

9. Braszczyńska-Malik K. N. Discontinuous and continuous precipitation in magnesium–aluminium type alloys // *J. Alloys Comp.* – 2009. – Vol. 477. – P. 870–876.

10. Bhan S., Lal A. The Mg–Zn–Zr System (Magnesium–Zinc–Zirconium) // *Journal of Phase Equilibria*. – 1993. – Vol. 14. – No. 5. – P. 634–637.

11. Investigation on the Alloy Phases in As-aged ZK60 Magnesium Alloy / F. Pan, W. Wang, Y. Ma, R. Zuo, A. Tang, J. Zhang // *Materials Science Forum*. – 2005. – Vol. 488–489. – P. 181–184.

12. Полухин П.И., Горелик С.С., Воронцов В.К. Физические основы пластической деформации. – М.: Metallurgy, 1982. – 584 с.

13. Hiura F. Latent Hardening in pure magnesium single crystals // *Master of Science thesis*. – Canada, 2010. – 116 p.

14. Черняева Т.П., Грицина В.М. Характеристики ГПУ-металлов, определяющие их поведение при механическом, термическом и радиационном воздействии // *Вопросы атомной науки и техники*. – 2008. – Вып. 2. – С. 15–27.

15. De-formation twinning in AZ31: Influence on strain hardening and texture evolution / M. Knezevic, A. Levinson, R. Harris, R.K. Mishra, R.D. Doherty, S.R. Kalidindi // *Acta Mater.* – 2010. – Vol. 58. – P. 6230–6242.

16. Non-Schmid behaviour during secondary twinning in a polycrystalline magnesium alloy / M.R. Barnett, Z. Keshavarz, A.G. Beer, X. Ma // *Acta Mater.* – 2008. – Vol. 56. – P. 5–15.

17. Скрябина Н.Е., Пинюгжанин В.М., Фрушар Д. Механизмы формирования текстуры сплава AZ31 в процессе РКУП // *Вестник Пермского университета. Физика*. – 2011. – Вып. 2(17). – С. 79–86.

References

1. Tarasov B.P., Lototskii M.V., Yartys B.A. Problema khraneniia vodoroda i perspektivy ispol'zovaniia gidridov dlia akkumulirovaniia vodoroda [The problem of hydrogen storage and prospects hydrides for hydrogen storage]. *Rus. Chem. J.*, 2006, vol. 1, no. 6, pp. 34-48.
2. Skryabina N.E., Fruchart D., Girard G., Miraglia S. Formirovanie tekstury deformatsii v splave AZ31 pod vozdeistviem ravnokanal'nogo uglovogo pressovaniia [Creation of the texture deformation in AZ31 alloy under equal channel angle pressing]. *Bulletin of the Perm University. Series Physics*, 2010, vol. 1, pp. 97-101.
3. Valiev R.Z., Langdon T.G. Principles of equal channel angular pressing as a processing tool for grain refinement. *Prog. In Mater. Sci.*, 2006, vol. 51, pp. 881-981.
4. Girard G., Fruchart D., Miraglia S. [et al.] Equal Channel Angular Pressing (ECAP), a severe plastic deformation (SPD) technique to promote fast hydrogen absorption in mg alloys. *Metal Hydrogen Systems: Proc. Inter. Sympos. Moscow*, 2010, p. 141.
5. Pshenichnikov Y.P. Vyiavlenie tonkoi struktury kristallov [Identification of the fine structure of crystals]. Moscow: Metallurgy, 1974. 528 p.
6. Diagrams of binary metallic systems. Vol. 1. Moscow: Mashinostroyeniye, 1996, pp. 167-170.
7. Celotto S., Bastow T.J. Study Of Precipitation In Aged Binary Mg-Al And Ternary Mg-Al-Zn Alloys Using ^{27}Al NMR Spectroscopy. *Acta Materialia*, 2001, vol. 49, pp. 41-51.
8. Tang N., Wang M. P., Lou H. F., Zhao Y. Y., Li Z. Microstructure and texture of twin-roll cast Mg-3Al-1Zn-0.2Mn magnesium alloy. *Materials Chemistry and Physics*, 2009, vol. 116, pp. 11-15.
9. Braszczyńska-Malik K.N. Discontinuous and continuous precipitation in magnesium-aluminium type alloys. *J. Alloys Comp.*, 2009, vol. 477, pp. 870-876.
10. Bhan S., Lal A. The Mg-Zn-Zr System (Magnesium-Zinc-Zirconium). *Journal of Phase Equilibria*, 1993, vol. 14, no. 5, pp. 634-637.
11. Pan F., Wang W., Ma Y., Zuo R., Tang A., Zhang J. Investigation on the Alloy Phases in As-aged ZK60 Magnesium Alloy. *Materials Science Forum*, 2005, vol. 488-489, pp. 181-184.
12. Poluhin P.I., Gorelik S.S., Vorontsov V.K. Fiziicheskie osnovy plasticheskoi deformatsii [Physical basis of plastic deformation]. Moscow: Metallurgy, 1982. 584 p.

13. Hiura F. Latent Hardening in pure magnesium single crystals. *Master of Science thesis*. Canada, 2010, 116 p.

14. Chernyaeva T.P., Gritsina V.M. Kharakteristiki GPU-metallov, opredelilaiushchie ikh povedenie pri mekhanicheskom, termicheskom i radiatsionnom vozdeistvii [Features hcp metals that determine their behavior under mechanical, thermal and radiative forcing]. *Problems of Atomic Science and Technology*, 2008, iss. 2, pp. 15-27.

15. Knezevic M., Levinson A, Harris R., Mishra R.K., Doherty R.D., Kalidindi S.R. De-formation twinning in AZ31: Influence on strain hardening and texture evolution. *Acta Mater.*, 2010, vol. 58, pp. 6230-6242.

16. Barnett M.R., Keshavarz Z., Beer A.G., Ma X. Non-Schmid behaviour during secondary twinning in a polycrystalline magnesium alloy. *Acta Mater.*, 2008, vol. 56, pp. 5-15.

17. Skryabina N.E., Pinyugzhanin V.M. Fruchart D. Mekhanizmy formirovaniia tekstury splava AZ31 v protsesse RKUP [Mechanisms of AZ31 alloy texture formation during ECAP]. *Bulletin of the Perm University. Series Physics*, 2011, vol. 2(17), pp. 79-86.

Об авторах

Скрябина Наталия Евгеньевна (Пермь, Россия) – доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры физики твердого тела Пермского государственного национального исследовательского университета (614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15, e-mail: natskryabina@mail.ru).

Аптуков Валерий Нагимович (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой фундаментальной математики Пермского государственного национального исследовательского университета (614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15, e-mail: aptukov@psu.ru).

Романов Петр Владимирович (Пермь, Россия) – аспирант, механико-математический факультет Пермского государственного национального исследовательского университета (614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15, e-mail: petr_gom@yahoo.com).

Фрушар Даниель (Гренобль, Франция) – руководитель подразделения МСМФ Института Нееля, НЦНИ (BP166, 38042, Гренобль, Франция, e-mail: daniel.fruchart@neel.cnrs.fr).

About the authors

Nataliya E. Skryabina (Perm, Russian Federation) – Professor, Professor of Department of Physics Status Solid, Perm State National Research University (15, Bukirev Str., 614990, Perm, Russian Federation, e-mail: natskryabina@mail.ru).

Valery N. Aptukov (Perm, Russian Federation) – Professor, Head of Department of Fundamental Mathematics, Perm State National Research University (15, Bukirev Str., 614990, Perm, Russian Federation, e-mail: aptukov@psu.ru).

Petr V. Romanov (Perm, Russian Federation) – Postgraduate student at Department of Mechanic and Mathematics, Perm State National Research University (15, Bukirev Str., 614990, Perm, Russian Federation, e-mail: petr_rom@yahoo.com).

Daniel Fruchart (Grenoble, France) – Director of Research on Department MCMF, Institut Néel, CNRS (BP 166, 38042, Grenoble, France, e-mail: daniel.fruchart@neel.cnrs.fr).

Получено 20.06.2014

Пробьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Влияние равноканального углового прессования на механические свойства и микроструктуру образцов магниевых сплавов / Н.Е. Скрябина, В.Н. Аптуков, П.В. Романов, Д. Фрушар // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2014. – № 3. – С. 113–128. DOI: 10.15593/perm.mech/2014.3.07

Please cite this article in English as:

Skryabina N.E., Aptukov V.N., Romanov P.V., Fruchart D. Impact of equal-channel angular pressing on mechanical behavior and microstructure of magnesium alloys. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2014. No. 3. Pp. 113-128. DOI: 10.15593/perm.mech/2014.3.07