

Получено: 25.10.2022 г. | Принято: 30.10.2022 г. | DOI: https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.7-8.426.433 Научная статья

ПРОЧНОСТНЫЕ И КОРРОЗИОННЫЕ СВОЙСТВА УМЗ-СПЛАВА Mg-Zn-Ca

Г.Д.Худододова^{1, 2}, мл. науч. сотр., ORCID: 0000-0002-1273-8518 / khudododova.gd@gmail.com **О.Б.Кулясова**^{1, 2}, к.т.н., доц., ORCID: 0000-0002-1761-336X **Р.К.Исламгалиев**¹, д.ф.-м.н., проф., ORCID: 0000-0002-6234-7363

Аннотация. В данной работе представлены результаты исследований влияния ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры на прочностные и коррозионные свойства магниевого сплава Mg-1%Zn-0,2%Ca. Особое внимание уделено изучению влияния УМЗ-структуры на скорость коррозии. Методами растровой электронной микроскопии (РЭМ) и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) изучены особенности структуры после коррозионных испытаний в растворе Рингера. Методами рентгеноструктурного анализа определены кристаллографические плоскости, наиболее подверженные коррозионному воздействию. Обсуждается различие в коррозионном поведении крупнозернистых и УМЗ-образцов.

Ключевые слова: магний, прочность, пластичность, интенсивная пластическая деформация, равнокональное угловое прессование, коррозия

Для цитирования: Г.Д. Худододова, О.Б. Кулясова, Р.К. Исламгалиев. Прочностные и коррозионные свойства УМЗ-сплава Mg-Zn-Ca. НАНОИНДУСТРИЯ. 2022. Т. 15, № 7-8. С. 426-433. https://doi. org/10.22184/1993-8578.2022.15.7-8.426.433

Received: 25.10.2022 | Accepted: 30.10.2022 | DOI: https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.7-8.426.433 Original paper

STRENGTH AND CORROSION RESISTANCE OF THE UFG Mg-Zn-Ca ALLOY

G.D.Khudododova^{1, 2}, Junior Researcher, ORCID: 0000-0002-1273-8518 / khudodova.gd@gmail.com O.B.Kulyasova^{1, 2}, Cand. of Sci. (Tech), Assistant Professor, ORCID: 0000-0002-1761-336X R.K.Islamgaliev¹, Doct. of Sci. (Physics and Mathematics), Prof., ORCID: 0000-0002-6234-7363

Abstract. This paper presents the results of studying the effect of an ultrafine-grained structure on the strength and corrosion resistance of a magnesium alloy Mg-1%Zn-0.2%Ca. Special attention is paid to the study of the influence of UFG structure on the corrosion resistance. Scanning electron microscopy (SEM) and transmission electron microscopy (TEM) were used to study the structure after corrosion in Ringer's solution. The crystallographic planes exposed most susceptible to corrosion in the Ringer's solution were determined by X-ray diffraction. The difference in the corrosion behavior of coarse-grained and UFG samples is discussed.

Keywords: magnesium, strength, ductility, severe plastic deformation, equal-angle pressing, corrosion

For citation: G.D. Khudododova, O.B. Kulyasova, R.K. Islamgaliev. Strength and corrosion resistance of the UFG Mg-Zn-Ca alloy. NANOINDUSTRY. 2022. V. 15, no. 7-8. PP. 426–433. https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.7-8.426.433

² Башкирский государственный университет, Уфа (Россия) / Bashkir State University, Ufa (Russia)

¹ Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа (Россия) / Ufa State Aviation Technical University, Ufa (Russia)

Известно, что магний является биорастворимым материалом, а также обладает плотностью и модулем упругости, близкими к свойствам кортикальной кости. Кроме этого, Mg содержится в организме человека и необходим для метаболизма костных тканей [1]. Так как Mg растворим в организме человека, то в последнее время разрабатываются различные коррозионностойкие сплавы на основе Mg для применения в качестве материалов для изготовления коронарных стентов и ортопедических устройств [2–4].

Для повышения прочности биомедицинских магниевых сплавов часто используют легирование нетоксичными элементами, например Zn и Ca. В частности, цинк является одним из наиболее распространенных элементов в организме человека и является софактором для специфических ферментов в кости [5], а кальций является основным компонентом в кости человека и полезен для роста/заживления кости [6]. Вместе с тем добавки легирующих элементов могут приводить к образованию вторых фаз в магниевых сплавах, которые вызывают локальную гальваническую коррозию [7–8].

Другими методами повышения прочностных свойств металлических материалов является измельчение зеренной структуры и дисперсионное упрочнение. В частности, ранее было показано, что применение интенсивной пластической деформации (ИПД) ведет к формированию ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры и равномерному распределению дисперсных частиц вторых фаз [9–13].

К настоящему времени известны публикации, в которых рассмотрены структура, механические свойства и коррозионная стойкость магниевых сплавов системы Mg-Zn-Ca с различным содержанием Zn и Ca, но они были выполнены на образцах с крупнозернистой структурой [14-17]. При этом известны единичные работы [9, 18], посвященные исследованию структуры и свойств магниевых сплавов системы Mg-Zn-Ca, подвергнутых равноканальному угловому прессованию (РКУП) с целью повышения механических свойств за счет формирования УМЗ-состояния. Однако уровень свойств не достиг высоких значений, так как применение метода РКУП в этих работах не позволило измельчить зеренную структуру до размеров менее нескольких микрон.

Целью настоящей работы явилось исследование влияния УМЗ-структуры, полученной комбинированием методов ИПД, на механические свойства и коррозионную стойкость на примере сплава Mg-1 вес.% Zn-0,2 вес.% Са.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Литые исходные образцы магниевого сплава Mg-1Zn-0,2Ca (вес. %) были подвергнуты гомогенизационному отжигу при температуре 430 °С с временем выдержки 22 ч. Термическая обработка образцов проводилась в муфельной печи Nabertherm. К образцам было применено два метода интенсивной пластической деформации (ИПД) - равноканальное угловое прессование (РКУП) и интенсивная пластическая деформация кручением (ИПДК). Процесс РКУП проводился на оснастке с диаметром каналов 20 мм с углом пересечения каналов 120°. При РКУП было проведено по два прохода прессования с понижением температуры от 400 до 300 °С, общее количество проходов было равно шести. Дальнейшее измельчение зеренной структуры осуществляли методом ИПДК при комнатной температуре. Для этого от РКУП прутка были отрезаны диски диаметром 20 мм и толщиной 2 мм, которые подвергли кручению под давлением 6 ГПа с количеством оборотов, равным 0,5 и 1, при скорости 1 об/мин при комнатной температуре.

Аттестацию структуры проводили на световом микроскопе Olympus 51GX. Для анализа микроструктуры использовали растровый электронный микроскоп (РЭМ) JEM-6390 и просвечивающий электронный микроскоп (ПЭМ) JEM-2100 с ускоряющими напряжениями, соответственно, 10 и 200 кВ. Тонкие фольги готовили методом двухсторонней струйной электрополировки на установке Tenupole-5 с использованием электролита следующего состава: азотная кислота – 30%, метанол – 70%. Полировку проводили при температуре –30 °С и напряжении 8–14 В.

Для выявления кристаллографических плоскостей, наиболее подверженных коррозии, проводили анализ дифрактограмм, полученных на дифрактометре Rigaku Ultima IV со схемой гониометра Брэгга – Брентано на монохроматизированном медном излучении (U=40 кВ, I=40 мА). Перед и после коррозионных испытаний в течение 5 мин в растворе Рингера образцы для РСА подвергали очистке от продуктов коррозии в течение 3 мин в растворе (200 г CrO₃, 10 г AgNO₃, Ba(NO₃)₂, 1000 мл дистиллированная вода H₂O). Во время рентгеновских сьемок образцы дополнительно вращались вокруг своей оси, чтобы все кристаллографические плоскости соответствовали условиям Вульфа – Брэгга.

Измерения микротвердости (МТ, HV) были проведены методом Виккерса по диаметру образцов на микротвердомере Micromet 5101 с выдержкой нагрузки 50 г в течение 10 с. Механические



Puc.1. Структура сплава Mg-1%Zn-0,2%Ca: a – после гомогенизации; b, c – после РКУП; b – OM; b – ПЭМ Fig.1. Structure of the Mg-1%Zn-0.2%Ca alloy: a – after homogenization; b, c – after ECAP; b – OM; c – TEM

испытания на одноосное растяжение проводили на испытательной машине Instron 5982 при комнатной температуре. Плоские образцы с размерами рабочей части 4×1×0,5 мм³ были деформированы со скоростью нагружения 10⁻³ с⁻¹. На каждое состояние было испытано по три образца.

Наноматериалы

Коррозионные исследования магниевого сплава проводили гравиметрическим методом с использованием раствора Рингера. Каждый образец помещали в 30 мл коррозионной среды на месяц. Раствор поддерживали при комнатной температуре и обновляли каждые 48 ч. Поверхность образца, подвергаемая воздействию раствора Рингера, составила 3,76 см², плотность сплава была равна 1,78 г/см³. Масса образца до и после погружения измерялась с помощью аналитических весов с точностью 0,1 мг. Образцы каждый день промывались раствором для очистки от продуктов коррозии в соответствии с ГОСТ 21.073.3-75. Потеря массы ML (%) рассчитывалась по следующей формуле:

$$ML = \frac{(M_0 - M_t)}{M_0} \cdot 100\%,$$

где М₀ - масса образца до погружения; М_t - масса пробы через разные промежутки времени после удаления продуктов коррозии.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Микроструктурный анализ

На рис.la представлена структура исходного сплава Mg-1%Zn-0.2%Ca после гомогенизации, на которой видны крупные зерна твердого раствора со средним размером 250 мкм. В структуре присутствовали также частицы размером до 4 мкм, которые, по литературным данным, могут представлять из себя частицы Ca₂Mg₆Zn₃ [19]. После обработки методом РКУП была сформирована однородная



Puc.2. Структура сплава Mg-1%Zn-0,2%Ca: $a - nocne PKY\Pi + ИПДК 0,5 ob.; b - структура сплава nocne PKY\Pi + ИПДК 1 ob. Fig.2. Structure of the <math>Mg-1\%Zn-0.2\%Ca$ alloy: a - after ECAP + HPT 0.5 turn; b - structure of the alloy after ECAP + HPT 1 turn



Рис.3. а – диаграмма растяжения образцов после различных обработок; b – микротвердость сплава Mg–1%Zn–0,2%Ca после различных обработок

Fig.3. a - tensile tests; b - microhardness of the Mg-1%Zn-0.2%Ca alloy after various treatments

структура со средним размером зерен 3,7 мкм (puc.lb). В результате деформации сдвигом в процессе РКУП произошло значительное уменьшение среднего размера частиц до размера 200 нм (puc.lb), а также появление микродвойников (puc.lc).

С целью дальнейшего измельчения зеренной структуры к РКУП образцам дополнительно была применена обработка методом ИПДК с числом оборотов, равным 0,5 и 1. Структура после ИПДК трансформировалась в УМЗ со средним размером зерен около 250 нм при 0,5 оборотах (рис.2а) и 200 нм после 1 оборота ИПДК (рис.2b).

Механические свойства

Механические испытания на растяжение исследуемого сплава Mg-1%Zn-0,2%Са в гомогенизированном состоянии показали, что образцы обладают пределом прочности 125 МПа и демонстрируют относительное удлинение 8% (рис.3а).

Деформация методом РКУП привела к повышению предела прочности до 225 МПа и повышению пластичности до 16%.

В результате дальнейшего измельчения зеренной структуры при дополнительной деформации в 0,5 и 1 оборотов ИПДК предел прочности был увеличен и составил 263 и 283 МПа соответственно. Однако, чем больше степень деформации в процессе деформации кручением, тем меньше была пластичность сплава из-за формирования сильнодеформированной структуры, содержащей изначально большую плотность дефектов, препятствующих дополнительному зарождению и движению дислокаций в процессе растяжения.

Микротвердость образцов в исходном гомогенизированном состоянии составила 41,4 HV. В результате обработки методом РКУП микротвердость выросла до 63,1 HV (рис.3b). Дальнейшая обработка методом ИПДК на 0,5 и 1 оборот привела к увеличению значений микротвердости до 74,7 и 80,1 HV соответственно (рис.3b). Следует отметить, что после деформации методом РКУП и дополнительной обработки ИПДК 1 оборот значение микротвердости было увеличено почти в два раза по сравнению с исходным состоянием за счет сильного измельчения зеренной структуры (рис.2).

Анализ коррозионной стойкости

Исследования коррозионной стойкости проводили на образцах Mg-1%Zn-0,2%Ca с различным размером зерна (образцы в гомогенизированном состоянии (K3) – 250 мкм, РКУП – 3,7 мкм, РКУП+ИПДК 0,5 оборот и РКУП+ИПДК 1 оборот, 250 нм и 200 нм соответственно).

Было установлено, что КЗ-образцы уменьшились в весе на 11% после испытаний в течение месяца. Как видно из рис.1а, в КЗ-образцах присутствуют частицы Ca₂Mg₆Zn₃, которые выступают в роли катода в гальванической паре с α-Mg матрицей, играющей роль анода, что способствовало коррозионному растворению сплава.

При обработке методом РКУП, которая проходила с понижением температур от 400 до 300 °С, наряду с измельчением зеренной структуры произошло



Рис.4. а – вид образцов Мд–1%Zn–0,2%Са после испытаний; b – зависимость потери массы сплава Мд–1%Zn–0,2%Са в растворе Рингера в зависимости от времени выдержки

Fig.4. a – view of Mg–1%Zn–0.2% Ca samples after testing; b – dependence of the mass loss of the Mg–1% Zn–0.2% Ca alloy in Ringer's solution depending on the holding time

образование микродвойников (рис.1с). За счет образования микродвойников скорость коррозии при больших временах выдержки в растворе Рингера могла уменьшиться по сравнению с КЗ-образцами (рис.4а), поскольку расстояние между атомами в двойниковых границах значительно меньше по сравнению с произвольными границами.

Повышенная скорость коррозии в РКУП+ИПДК образцах сплава Mg-1%Zn-0,2%Ca (рис.4b) связана с тем, что в процессе ИПДК в образце образовалось большое количество дефектов кристаллической решетки в виде границ зерен (рис.2), которые способствовали интенсивной коррозии сплава.

Рентгеноструктурный анализ

Методом рентгеноструктурного анализа были проведены исследования образцов после гомогенизации и обработки РКУП+ИПДК 0,5 об. с целью выявления кристаллографических плоскостей, наиболее подверженных коррозионному воздействию в растворе Рингера. Образцы до и после коррозии подвергались очистке для удаления продуктов коррозии с поверхности. Соответствующие рентгенограммы и изображения поверхности образцов после коррозионных испытаний представлены ниже на рис.5 и 6.

ОБСУЖДЕНИЕ

Исследования методом ПЭМ показали, что в результате обработок РКУП и РКУП+ИПДК в сплаве Mg-1%Zn-0,2%Ca зеренная структура сильно измельчилась до среднего размера зерен 3,7 мкм и 200 нм соответственно (рис.2). Кроме этого, в структуре РКУП образцов наблюдались двойники деформации. Измельчение зеренной структуры после обработки методами интенсивной пластической деформации является типичным для многих металлических материалов. При этом минимальный средний размер зерна зависит от типа кристаллической решетки, твердости материала и температуры плавления.

Появление двойников деформации в магниевом сплаве, как в исходном состоянии, так и после обработки методом РКУП, может свидетельствовать о невысоких значениях энергии дефекта упаковки, поскольку склонность к двойникованию проявляют материалы с низкой энергией дефекта упаковки [20].

После измельчения зеренной структуры методами РКУП и РКУП+ИПДК образцы проявили повышенные значения микротвердости и предела прочности (рис.3). При этом после РКУП пластичность у них увеличилась, а после РКУП+ИПДК снизилась.

Возможными механизмами упрочнения в РКУП образце, очевидно, являются зернограничное упрочнение в соответствии с соотношением Холла – Петча [11], а также упрочнение за счет двойникования, поскольку в структуре образца были обнаружены двойники деформации (рис.1с), которые присутствовали также в исходном состоянии (рис.1а).

В исследуемом сплаве, имеющем ГПУ-решетку, пластическая деформация может быть обеспечена небольшим количеством благоприятно ориентированных плоскостей скольжения, которые



Рис.5. Относительная интенсивность рентгеновских пиков до и после коррозионных испытаний сплава Mg-1%Zn-0,2%Ca в течение 1 ч в растворе Рингера: a - гомогенизированное состояние; b - состояние РКУП + ИПДК 0,5 об. Fig.5. Relative intensity of X-ray peaks before and after corrosion tests of the Mg-1%Zn-0.2%Ca alloy for 1 hour in Ringer's solution: a - after homogenization; b - after ECAP + HPT 0.5 turn

способствуют зарождению и движению дислокаций. Поскольку механические испытания на растяжение были проведены на малых образцах, имевших площадь поперечного сечения 1×0,5 мм², то в гомогенизированном образце со средним размером зерен 250 мкм имелось небольшое количество зерен, в которых плоскости скольжения были бы благоприятно ориентированы относительно оси растяжения. Поэтому в гомогенизированных образцах было небольшое количество плоскостей скольжения и, соответственно, дислокаций, которые могли обеспечивать пластичность. В РКУП образцах со средним размером зерен 3,7 мкм количество зерен, имевших благоприятно ориентированные плоскости скольжения, было намного больше, что обеспечило зарождение и движение большого количества дислокаций, обеспечивших большую пластичность по сравнению с гомогенизированным образцом.

Кроме того, увеличение пластичности в РКУПобразцах возможно связано с наличием двойников, поскольку известно, что на повышение пластичности сплавов, содержащих двойники, дополнительное влияние оказывают процессы двойникования [21].

Снижение пластичности в РКУП+ИПДК образцах может быть связано с уменьшением среднего размера зерна в нанометрическую область, которое ведет к ограничению механизма дислокационного скольжения, часто наблюдаемого в ультрамелкозернистых материалах вследствие наличия большого количества дефектов кристаллической решетки [9].

После коррозионных испытаний было обнаружено, что в гомогенизированном состоянии в ряде кристаллографических плоскостей, таких как 100, 002, 102, 103 и 112 сильно снижается относительная интенсивность рентгеновских пиков, тогда как, например, для плоскости 101 такое снижение является незначительным (рис.5). Это свидетельствует о том, что коррозия поверхности магниевого сплава в гомогенизированном состоянии начинается с определенных кристаллографических плоскостей с последующим образованием вблизи них следов коррозии (рис.6а). В частности, на изображении поверхности гомогенизированного состояния видны следы коррозии, расположенных вдоль линий, которые очевидно соответствуют определенным кристаллографическим плоскостям (рис.6а).

В состоянии РКУП + ИПДК 0,5 об. после коррозионных испытаний не выявлено кристаллографических плоскостей, вдоль которых происходило бы преимущественное растворение материала в растворе Рингера (рис.6b). Это может быть связано с изменением механизма коррозии в этих образцах в сторону растворения материала на дефектах кристаллической решетки вследствие наличия большого количества границ зерен и повышенной плотности дислокаций, которые часто наблюдаются в образцах, подвергнутых интенсивной пластической деформации [12]. Вследствие этого, следы коррозии на изображениях поверхности образца РКУП + ИПДК 0,5 об. видны на местах



Рис.6. Изображение поверхности сплава Mg–1%Zn–0,2%Ca после коррозионных испытаний в течение 1 ч в растворе Рингера: а – гомогенизированное состояние; b – состояние РКУП + ИПДК 0,5 об. Fig.6. Image of the surface of the Mg–1%Zn–0.2%Ca alloy after corrosion tests for 1 hour in Ringer's solution: a – after homogenization; b – after ECAP + HPT 0.5 turn

расположения групп зерен, вытравленных в процессе коррозионных испытаний (рис.6b).

выводы

В магниевом сплаве Mg-1%Zn-0,2%Са в гомогенизированном состоянии коррозионное растворение материала начинается с определенных кристаллографических плоскостей 100, 002, 102, 103, 112.

Формирование микродвойников в РКУП-образцах ведет к снижению скорости коррозии при больших временах выдержки в растворе Рингера по сравнению с гомогенизированным состоянием.

В РКУП+ИПДК состоянии наблюдается незначительное растворение всех кристаллографических плоскостей во время коррозионных испытаний, а повышенная скорость коррозии обусловлена наличием большого количества дефектов кристаллической решетки.

ИНФОРМАЦИЯ О РЕЦЕНЗИРОВАНИИ

Редакция благодарит анонимного рецензента (рецензентов) за их вклад в рецензирование этой работы, а также за размещение статей на сайте журнала и передачу их в электронном виде в НЭБ eLIBRARY.RU.

Декларация о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в данной статье.

ЛИТЕРАТУРА

1. Yin D., Zhang E., Zeng S. Effect of Zn on mechanical property and corrosion property of extruded Mg-Zn-

Mn alloy // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2008. V. 18. PP. 763–768.

- 2. **Staiger M.P.**, **Pietak A.M.**, **Huadmai J.**, **Dias G.** Magnesium and its alloys as orthopedic biomaterials a review // Biomaterials. 2006. V. 27. PP. 1728–1734.
- 3. Maeng M., Jensen L.O., Falk E., Andersen H.R., Thuesen L. Negative vascular remodelling after implantation of bioabsorbable magnesium alloy stents in porcine coronary arteries: a randomised comparison with bare-metal and sirolimus-eluting stents // Heart. 2009. 95. PP. 241–246.
- 4. Zander D., Zumdick N.A. Influence of Ca and Zn on the microstructure and corrosion of biodegradable Mg-Ca-Zn alloys // Corrosion Science. 2015. 93. PP. 222-233.
- 5. Mani G., Feldman M.D., Patel D., Agrawal C.M. Coronary stents: A materials perspective // Biomaterials. 2007. V. 28. 9. PP. 1689–1710.
- Li Z.J., Gu X.N., Lou S.Q., Zheng Y.F. The development of binary Mg-Ca alloys for use as biodegradable materials within bone // Biomaterials. 2008. V. 29. Is. 10. PP. 1329–1344.
- Gu X.N., Zheng Y.F., Zhong S.P. Xi T.F., Wang J.Q., Wang W.H. Corrosion of and cellular responses to Mg-Zn-Ca bulk metallic glasses // Biomater. PP. 1093–1103.
- 8. Kim W.C., Kim J.G., Lee J.Y., Seol H.K. Influence of Ca on the corrosion properties of magnesium for biomaterials // Mater Lett. 2008. 62. PP. 4146-4148.
- Vinogradov A., Vasilev E., Kopylov V.I., Linderov M., Brilevesky A., Merson D. High performance fine-grained biodegradable Mg-Zn-Ca alloys processed by severe plastic deformation // Metals. 2019. V. 9. P. 186.



- 11. Kulyasova O., Islamgaliev R., Mingler B., Zehetbauer M. Microstructure and fatigue properties of the ultrafine-grained AM60 magnesium alloy processed by equal-channel angular pressing // Mater. Sci. Eng. A. 2009. V. 503. PP. 176-180.
- 12. Valiev R.Z., Islamgaliev R.K., Alexandrov I.V. Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation // Prog Mater Sci. 2000. V. 45. PP. 103–189.
- 13. Tang L., Zhao Y., Liang N., Islamgaliev R.K., Valiev R.Z., Zhu Y.T. Microstructure and thermal stability of nanocrystalline Mg-Gd-Y-Zr alloy processed by high pressure torsion // Jounal of Alloys and Compounds. 2017. V. 721. PP. 577–585.
- Zhang B., Hou Y., Wang X., Wang Y., Geng L. Mechanical properties, degradation performance and cytotoxicity of Mg-Zn-Ca biomedical alloyswith different compositions // Mater. Sci. Eng. C. 2011. V. 31. PP. 1667–1673.
- 15. Sun Y., Zhang B., Wang Y., Geng L., Jiao X. Preparation and characterization of a new biomedical Mg-Zn-Ca alloy // Mater. Des. 2012. V. 34. PP. 58-64.

 Li W., Guan S., Chen J., Hu J., Chen S., Wang L., Zhu S. Preparation and in vitro degradation of the composite coating with high adhesion strength on biodegradation Mg-Zn-Ca alloy // Mater. Charact. 2011. V. 62. PP. 1158-1165.

433

- 17. Gong Ch., Xinze H.X.Y. Corrosion behavior of Mg-Ca-Zn alloys with high Zn content // J. Physics and Chemistry of Solids. 2021. V. 152.
- Tong L.B., Zheng M.Y., Chang H., Hu X.C., Wu K., Xu S.W., Kamado S., Kojima Y. Microstructure and mechanical properties of Mg-Zn-Ca alloy processed by equel channel angular pressing // Materials and Engeneereng A. 2009. V. 523. PP. 289–294.
- 19. Ying Zh.M., Yang Ch.L., Lui Y.J., Yuan F.S., Liang Sh.Sh., Li H.X., Znang J.Sh. Microstructure, mechanical, and corrosion properties of extruded lowalloyed Mg-xZn-0.2Ca alloys // J. Metallurgy and Materials. 2019. V. 26. P. 1274.
- Jiang L., Jonas J.J., Mishra R.K., Luo A.A., Sachdev A.K., Godet S. Twinning and texture development in two Mg alloys subjected to loading along three different strain paths // Acta Materialia. 2007. V. 55. PP. 3899–3910.
- Cooman B.C.D., Estrin Y., Kim S.K. Twinninginduced plasticity (TWIP) steels // Acta Materialia. 2018. V. 142. PP. 283–362.

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ТЕХНОСФЕРА» ПРЕДСТАВЛЯЕТ КНИГУ:



Юрген Бёккер СПЕКТРОСКОПИЯ

Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2021. - 528 с., ISBN 978-5-94836-220-5

Цена 760 руб.

Спектроскопия как средство описания атомов, ионов и молекул с помощью типовых длин волн, измеряемых при возбуждении, принадлежит сегодня к важнейшим и самым распространенным методам инструментальной аналитики. Специальные измерительные устройства, в том числе абсорбционные и эмиссионные спектрометры, обеспечивают точное определение количественного и качественного состава газообразных, жидких и твердых веществ.

В книге дается обзор разных методов атомной и молекулярной спектрометрии и рассматриваются многие аналитические проблемы, решаемые в лабораториях промышленных предприятий, в естественнонаучных и технических учреждениях, а также проблемы изучения и защиты объектов окружающей среды. В книге представлена широкая гамма существующих методов исследования, а также перечень приборов с руководством по их применению.

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

125319, Москва, а/я 91; тел.: +7 495 234-0110; факс: +7 495 956-3346; e-mail: knigi@technosphera.ru; sales@technosphera.ru