

Данил Тимурович Мифтахов^{1*}, Альфиз Ильгизович Гареев¹, Евгений Викторович Воробьёв¹, Григорий Сергеевич Дьяконов¹

¹Уфимский университет науки и технологий, г. Уфа, Россия

**danil.miftahov@yandex.ru*

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ И ДЕФОРМАЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БИОРАЗЛАГАЕМОГО МАГНИЕВОГО СПЛАВА MG-1ZN-0,2CA

В данной работе было рассмотрено влияние времени выдержки при проведении гомогенизационного отжига на структурные изменения и механические свойства магниевого сплава Mg-1Zn-0,2Ca. Гомогенизационный отжиг при $T = 450\text{ }^{\circ}\text{C}$ привел к увеличению среднего размера зерна и выделению частиц второй фазы. Отжиг в течение 8 часов обеспечил значительное повышение пластичности магниевого сплава. Комбинированная деформационная обработка методом экструзия + равноканальное угловое прессование + экструзия привела к увеличению прочности сплава с 120 МПа в литом состоянии до 340 МПа.

Ключевые слова: магнелиевые сплавы, механические свойства, термическая обработка, деформационно-термическая обработка.

Danil T. Miftakhov, Alfiz I. Gareev, Evgeni V. Vorobiev, Grigory S. Dyakonov

INFLUENCE OF THERMAL AND DEFORMATION-THERMAL TREATMENT ON THE STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF BIODEGRADABLE MAGNESIUM ALLOY MG-1ZN-0.2CA

In this paper, the effect of holding time during homogenization annealing on structural changes and mechanical properties of magnesium alloy Mg-1Zn-0.2Ca was considered. Homogenization annealing at $T = 450\text{ }^{\circ}\text{C}$ led to an increase in the average grain size and the precipitation of second-phase particles. Annealing for 8 hours provided a significant increase in the ductility of the magnesium alloy. Combined deformation treatment by extrusion + equal-channel angular pressing + extrusion led to an increase in the strength of the alloy from 120 MPa in the cast state to 340 MPa.

Key words: magnesium alloys, mechanical properties, heat treatment, deformation-heat treatment.

В настоящее время создание имплантатов из биоразлагаемых материалов является актуальной задачей в медицине. Одним из перспективных материалов может стать магний, по причине легкости, высокой биосовместимости и модулем упругости, сходными с модулем упругости кости. В связи с тем, что большая часть магния в человеческом организме содержится в костях, имплантат на его основе будет способствовать

образованию костной ткани без выделения токсичных продуктов разложения [1-3].

Однако чистый магний обладает низким значением предела прочности для применения в имплантологии. Для повышения прочностных характеристик применяют упрочнение легирующими элементами. Такими элементами являются цинк (Zn) и кальций (Ca). Цинк способствует заживлению ран, повышает иммунную активность организма, поддерживает синтез белка, ДНК, а так же отвечает за чувство вкуса и обоняния [4]. В свою очередь кальций способствует росту костей, функционированию клеток, свертываемости крови, сокращению мышц и регуляции сердцебиения [5].

В процессе литья магниевых сплавов, могут образовываться дефекты различного рода. Такие недостатки приводят к неоднородности структуры и химического состава, что сильно отражается на необходимых свойствах сплава, такие как прочность, пластичность, коррозионная стойкость и т.д. Для устранения данных недостатков применяют гомогенизационный отжиг. Анализ актуальной литературы показал, что режимы гомогенизационного отжига сплава Mg-1Zn-0,2Ca не исследовались другими авторами.

Повышения механических свойств металлов и сплавов можно достичь путем различных методов деформационно-термической обработки (ДТО). Одним из перспективных методов обработки является интенсивная пластическая деформация (ИПД) методом равноканального углового прессования (РКУП), благодаря такой обработке возможно достичь значительного улучшения свойств магниевых сплавов, за счет измельчения структуры. Целью данной работы является исследования микроструктурных изменений и механических свойств магниевого сплава после гомогенизационных отжигов, а также выбор режима гомогенизационного отжига для проведения последующей ДТО.

В качестве материала исследования был выбран магниевый сплав Mg-1Zn-0,2Ca. Гомогенизационный отжиг проводился в печи Nabertherm GmbH при температуре 450 °C в течение 4, 8, 12 и 24 часов. Охлаждение осуществлялось на воздухе. Для выявления микроструктуры поверхность полированных образцов подвергали химическому травлению в растворе 70 % H₂O + 30 % HNO₃. Исследования микроструктуры проводились с использованием оптического микроскопа Olympus GX 51.

После гомогенизационного отжига образцы диаметром 40 мм и длиной 80 мм деформировали методом экструзии при температуре 350 °C до диаметра 20 мм, далее проводили деформацию методом РКУП по маршруту Вс, матрица имела углы $\varphi = 120^\circ$. Перед каждым проходом РКУП заготовку нагревали в течение 10-12 минут.

Первый проход РКУП проводили при $T = 400^\circ\text{C}$, после каждого прохода для более эффективного измельчения структуры температура деформации снижалась на 50 °C. На последнем проходе образец нагревали до 200 °C. Деформация на каждом проходе ε_n рассчитывалась по следующей формуле:

$$\varepsilon_n = \frac{2}{\sqrt{3}} \cot\left(\frac{\varphi}{2}\right) \quad (1)$$

где φ – угол РКУП матрицы.

Заключительным этапом была повторная деформация методом экструзии с диаметра 16 мм до 12 мм, экструзия проводилась при температуре 200 °С.

Суммарная степень деформации после проведения комбинированной деформационной обработки составила $\varepsilon_n \approx 4,6$. Механические испытания на растяжение проводились на разрывной машине Instron 5982 при комнатной температуре со скоростью 1 мм/мин. Было испытано минимум по три образца для каждого состояния.

После проведения отжига со временем выдержки 4 часа наблюдается рост среднего размера зерна по сравнению с литым образцом, с 175 мкм до 250 мкм. Дальнейшее увеличение времени выдержки не приводит к существенным изменениям среднего размера зерна. Однако, наблюдается выделение частиц в теле зерна. На рис. 1 приведены снимки микроструктуры магниевого сплава Mg-1Zn-0,2Ca после ТО.

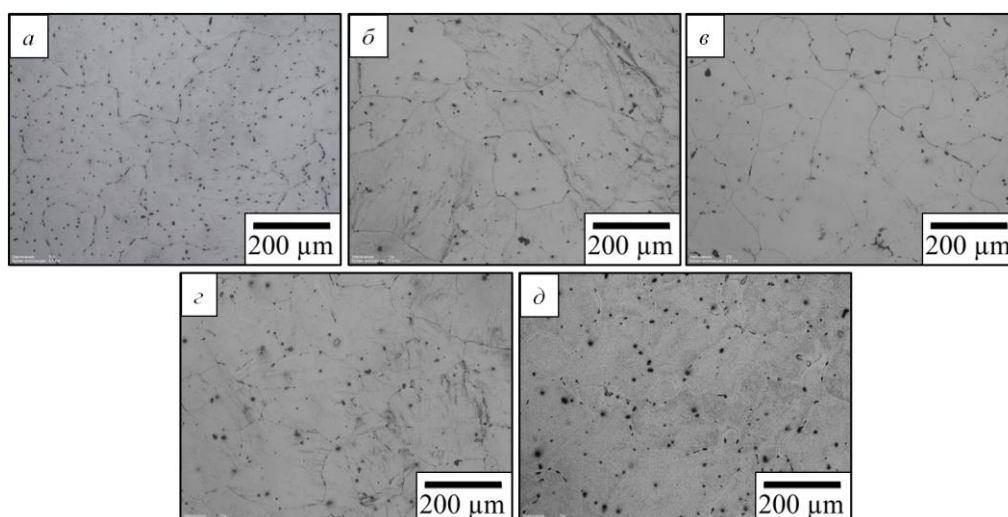


Рис. 1. Микроструктура сплава Mg-1Zn-0,2Ca после термической обработки при температуре 450 °С с разным временем выдержки:

a – литое состояние; *б* – 4 часа; *в* – 8 часов; *г* – 12 часов; *д* – 24 часа

Проведение отжига с выдержкой 4 часа приводит к незначительным изменениям прочности и пластичности, что может быть связано с ростом среднего размера зерна. После 8 часовой выдержки прочность вырастает почти в 1,5 раза (с ~ 120 МПа до ~ 160 МПа), а пластичность в 2,5 раза (с ~ 4,0 % до ~ 10,0%). Причину роста прочности можно связать с твердорастворным упрочнением за счет высокой растворимости цинка в сплаве. Дальнейшее увеличение времени выдержки не приводит к повышению прочностных свойств, однако наблюдается увеличение пластичности в ~ 1,5 раза по сравнению с литым состоянием. Диаграмма зависимости механических свойств от времени выдержки приведена на рис. 2.

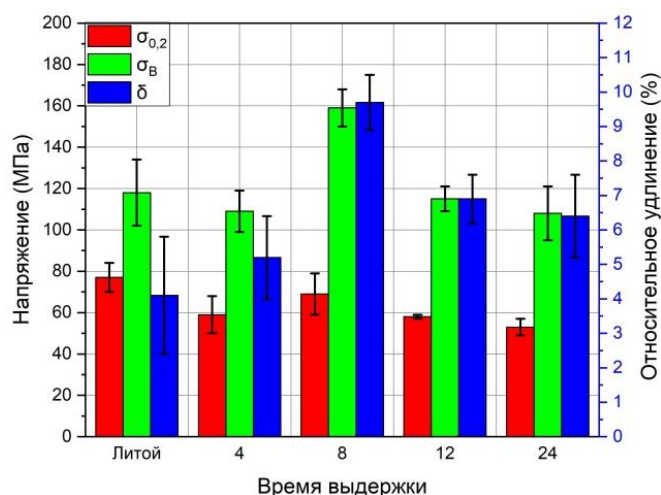


Рис. 2. Диаграмма механических свойств магниевого сплава Mg-1Zn-0,2Ca в литом состоянии и после отжигов

Магний обладает гексагональной плотноупакованной (ГПУ) кристаллической решеткой, что приводит к затруднению пластической деформации при комнатной температуре. Обусловлено это тем, что сдвиг в гексагональной решетке магния при низких температурах осуществляется по плоскости базиса. Для предотвращения разрушения образца в ходе пластической деформации необходимо обеспечить хорошую технологическую пластичность. По этой причине был выбран следующий режим гомогенизационного отжига: $T = 450\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 8 часов. После отжига по этому режиму магниевый сплав Mg-1Zn-0,2Ca характеризуется средним размером зерна 250 мкм, пределом текучести $\sigma_{0,2} \approx 70\text{ МПа}$, пределом прочности $\sigma_b \approx 160\text{ МПа}$ и относительным удлинением $\delta \approx 10,0\%$.

Проведение ДТО приводит к значительному уменьшению среднего размера зерна более чем в 100 раз (с 250 мкм до 2 мкм). Такое измельчение зеренной структуры приводит к увеличению прочности в 2 раза с сохранением пластичности (предел текучести $\sigma_{0,2} \approx 320\text{ МПа}$, предел прочности $\sigma_b \approx 340\text{ МПа}$ и относительное удлинение $\delta \approx 10,0\%$).

ВЫВОДЫ

1. Проведение гомогенизационного отжига при $T = 450\text{ }^{\circ}\text{C}$ приводит к увеличению среднего размера зерна. Был выбран режим с выдержкой в течение 8 часов, за счет достижения механических свойств приемлемых для проведения ДТО (предел текучести $\sigma_{0,2} \approx 70\text{ МПа}$, предел прочности $\sigma_b \approx 160\text{ МПа}$ и относительное удлинение $\delta \approx 10,0\%$).
2. Комбинированная ДТО по схеме экструзия + РКУП + экструзия приводит к значительному измельчению зерен с 250 мкм до 2 мкм. Формирование мелкозернистой структуры привело к увеличению прочности в 2 раза и увеличению пластичности в 2,5 раза по сравнению с литым образцом (предел текучести $\sigma_{0,2} \approx 320\text{ МПа}$, предел прочности $\sigma_b \approx 340\text{ МПа}$ и относительное удлинение $\delta \approx 10,0\%$).

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского
научного фонда, грант № 23-79-00074. <https://rscf.ru/project/23-79-00074/>*

REFERENCES

1. Zheng Y. F. Biodegradable metals (2014) / Y. F. Zheng, X. N. Gu, F. Witte // Materials Science & Engineering R-Reports. V. 77. P. 1-34. DOI: 10.1016/j.mser.2014.01.001
2. Zhao D. Current status on clinical applications of magnesium-based orthopaedic implants: A review from clinical translational perspective / D. Zhao [et al.] // Biomaterials 112. 2017. P. 287-302. DOI: 10.1016/j.biomaterials.2016.10.017
3. de Baaij J.H.F. Magnesium in man: implications for health and disease / J.H.F. de Baaij, J. G. J. Hoenderop, R.J.M. Bindels // Physiological Reviews. 2015. V. 95(1). P. 1-46. DOI: 10.1152/physrev.00012.2014
4. Wani A. Zinc: an element of extensive medical importance. / A. Wani [et al.] // Curr Med Res Pract. 2017. V. 7(3). P. 90-98. DOI:10.1016/j.cmrp.2017.02.006
5. Pravina P. Calcium and its role in human body. / P. Pravina, D. Sayaji, M. Avinash // Int J Res Pharm Biomed Sci. 2015. V. 4(2). P. 659-668.