

Научная статья

УДК 669-1

doi: 10.17223/19988621/79/13

Исследование влияния наночастиц алмаза на структуру и механическое поведение сплава Mg–Ca–Zn

Михаил Александрович Селиховкин¹,
Анастасия Алексеевна Ахмадиева², Илья Александрович Жуков³,
Екатерина Сергеевна Марченко⁴, Антон Павлович Хрусталеv⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Томский государственный университет, Томск, Россия

¹ mishselikh@gmail.com

² nas99.9@yandex.ru

³ gofra930@gmail.com

⁴ 89138641814@mail.ru

⁵ tofik0014@gmail.com

Аннотация. Представлены исследования влияния наночастиц алмаза на магниевый сплав системы Mg–Ca–Zn. Исследованы структура и механическое поведение магниевого сплава с содержанием наночастиц и без. Показано, что введение наночастиц алмаза в сплав магния системы Mg–Ca–Zn позволяет получить мелкозернистую структуру. При введении алмазных наночастиц в сплав увеличиваются предел текучести, предел прочности и пластичность. Показано, что значение твердости модифицированного сплава не изменяется.

Ключевые слова: магний, наноразмерные частицы, алмаз, структура, механические свойства

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-15-2021-1384).

Для цитирования: Селиховкин М.А., Ахмадиева А.А., Жуков И.А., Марченко Е.С., Хрусталеv А.П. Исследование влияния наночастиц алмаза на структуру и механическое поведение сплава Mg–Ca–Zn // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2022. № 79. С. 152–161. doi: 10.17223/19988621/79/13

Original article

Investigation of the effect of diamond nanoparticles on the structure and mechanical behavior of Mg–Ca–Zn alloy

Mikhail A. Selikhovkin¹, Anastasia A. Akhmadieva², Il'ya A. Zhukov³,
Ekaterina S. Marchenko⁴, Anton P. Khrustalev⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

¹ mishselikh@gmail.com

² nas99.9@yandex.ru

³ gofra930@gmail.com

⁴ 89138641814@mail.ru

⁵ tofik0014@gmail.com

Abstract. In this paper, the study of the effect of diamond nanoparticles on the structure and mechanical properties of the Mg-Ca-Zn magnesium alloy. The influence of diamond nanoparticles concentration amount of 0.1 wt. % in the structure of alloy Mg-Ca-Zn, the ultimate tensile strength increases from 294 up to 332 MPa, the elongation value increases from 22 % up to 27 % and the yield strength increases from 66 up to 75 MPa in the tested samples. Nanoparticles in magnesium alloy do not change the hardness of the alloy. The introduction of diamond nanoparticles into the magnesium alloy increased the Zn concentration from 4 % to 4.7 % and the Ca concentration from 1 % to 1.3 %. It is found that the introduction of the nanodiamond particles into a magnesium melt contributes to a decrease in the average grain size from ~ 100 to $64 \mu\text{m}$ in the obtained castings and, as a result, to an increase in the mechanical properties.

Keywords: magnesium, nanosized particles, diamond, structure, mechanics properties

Acknowledgments: This work was carried out with financial support from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (agreement No. 075-15-2021-1384).

For citation: Selikhovkin, M.A., Akhmadieva, A.A., Zhukov, I.A., Marchenko, E.S., Khrustalyov, A.P. (2022) Investigation of the effect of diamond nanoparticles on the structure and mechanical behavior of Mg-Ca-Zn alloy. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 79. pp. 152–161. doi: 10.17223/19988621/79/13

Введение

В настоящее время сплавы титана и стали используют как материал для создания медицинских имплантатов. Данные материалы зарекомендовали себя при замене поврежденных костных тканей, однако такие имплантаты имеют один значительный недостаток – необходимость в повторной операции для удаления конструкции из тела человека [1]. Одним из активно развивающихся направлений сердечно-сосудистой хирургии и ортопедии является создание биорезорбируемых имплантатов, которые после вживления в организм человека постепенно растворяются в нем и положительно влияют на восстановление костной ткани. Магний и его сплавы являются перспективными для создания на их основе биорезорбируемых имплантатов [2]. Однако существуют ограничения по применению данных материалов в медицине, связанные с недостаточными физико-механическими и эксплуатационными характеристиками чистого магния. Недостаточные показатели прочности и пластичности затрудняют применение магниевых сплавов на практике [3]. Ранее проводившиеся работы были направлены на получение ультрамелкозернистой структуры путем усложнения химического состава, добавления различных элементов [4]. Такой подход имеет свои трудности, связанные с ограниченным выбором легирующих элементов, которые должны являться биологически совместимыми со средой организма. В качестве легирующих элементов используются кальций, цинк, а также редкоземельные металлы [5].

Легирование цинком повышает коррозионную стойкость и прочностные свойства магниевых сплавов [6, 7], а введение кальция способствует измельчению зеренной структуры магниевых сплавов за счет образования мелкодисперсной фазы Mg_2Ca , которая является когерентной относительно магния, поэтому зарождение и рост кристаллов на этой фазе начинаются раньше, что обеспечивает создание новых центров кристаллизации и получение более мелкой структуры с увеличением механических свойств [8]. Кроме этого, для улучшения механических характеристик магниевых сплавов возможно использование дисперсного упрочнения неметаллическими частицами. Большой интерес вызывает использование в сплавах магния наночастиц нитрида алюминия, оксида алюминия и алмаза, которые характеризуются высокой удельной прочностью и низким коэффициентом теплового расширения [9]. Перспективным упрочнителем медицинского магния является наноразмерный алмаз, поскольку он биосовместим и нетоксичен для организма человека [10].

Цель работы – исследование влияния наночастиц алмаза на химический состав, структуру и механические свойства магниевого сплава $Mg-Ca-Zn$.

Методика получения сплавов

В качестве исходных материалов использованы магний (99.5%), цинк (99.8%), кальций (99.8%), а также лигатура $Mg - 5 \text{ мас. \% С}$. Для получения лигатуры была использована порошковая смесь, содержащая 95 мас. % микропорошка магния марки МПФ-4 и 5 мас. % наночастиц алмаза со средним размером 10 нм. Порошковая смесь прессовалась с использованием метода ударно-волнового компактирования под действием продуктов детонации контактных зарядов взрывчатого вещества. Два килограмма чистого металла магния (99.5%) помещались в стальной тигель и расплавлялись с использованием муфельной печи открытого типа при одновременном обдуве аргоном в качестве защитной среды. Обдув аргоном осуществлялся на протяжении всего процесса обработки расплава до его заливки в кокиль.

При температуре 720°C в расплав магния вводился металлический цинк с одновременным механическим перемешиванием. Для введения металлического кальция использовался стальной погружной колокольчик с последующим механическим перемешиванием при температуре 760°C . Механическая обработка расплава производилась с использованием смесителя при скорости вращения 1 200 об/мин в течении 20 с после растворения цинка, кальция [11].

Лигатура $Mg - 5\%$ наноалмаз вводилась в расплав $Mg-Ca-Zn$ при температуре 710°C с использованием механического смесителя в течение 1 мин после полного растворения лигатуры в сплаве.

После введения лигатуры расплав заливался в стальной кокиль размером $200 \times 100 \times 10 \text{ мм}$ при температуре 720°C . Заливка и кристаллизация расплава сопровождалась одновременной вибрационной обработкой с применением вибростенда, на котором жестко крепился стальной кокиль. Вибрационная обработка расплава осуществлялась с частотой 60 Гц и амплитудой 0.5 мм.

Исходный сплав $Mg - 4\% \text{ Ca} - 1\% \text{ Zn}$ (здесь и далее по тексту мас. %) был получен с аналогичными параметрами без введения лигатуры. Содержание алмаза в модифицированном сплаве составило 0.1 %.

Методы исследования

Химический состав сплавов исследован с использованием рентгенофлуоресцентного волнодисперсионного спектрометра последовательного действия Shimadzu XRF-1800. Металлографический анализ проводили с помощью оптического микроскопа Olympus GX71. Исследование структуры выполнено на оборудовании Томского регионального центра коллективного пользования Национального исследовательского Томского государственного университета. Центр поддержан грантом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-15-2021-693 (№ 13.ЦКП.21.0021). Структуру литых материалов изучали после механической шлифовки, полировки, до и после травления образцов пикриновой кислотой. Средний размер зерен определяли методом секущих по стандарту ASTM 112-13 по результатам не менее 500 измерений для каждого сплава. Пористость сплавов оценивали методом гидростатического взвешивания, а размер пор рассчитывали по изображениям микроструктуры аналогично среднему размеру зерна.

Измерения твердости по Бринеллю (НВ) проведены в соответствии со стандартом ASTM E103. Для проведения эксперимента использовался твердомер МЕТОЛАБ 703. Внедрение сферического индентора радиусом 2.5 мм проводили с усилием 62.5 кг и выдержкой 30 с, при этом контролировался размер отпечатков, который находился в пределах $0.2D < d < 0.6D$. Исследуемые поверхности подготавливались с помощью механической шлифовки. Эксперименты по сжатию проводились с использованием универсального электромеханического испытательного стенда Instron 3369 со скоростью нагружения 4.8 мм/мин. Образцы шириной 9 мм, длиной 9 мм и высотой 20 мм вырезались из отливок при помощи электроэрозионной резки. Результаты испытаний получены в виде диаграмм «напряжение–деформация», откуда найдены значения условного предела текучести, временного сопротивления и относительных удлинений.

Исследование структуры

Химический состав магниевых сплавов представлен в табл. 1. Исследования элементного состава показали, что содержание магния в полученных сплавах составило около 94 мас. %. При этом содержание цинка и кальция в исходном сплаве Mg–Ca–Zn составило 4 и 1 мас. % соответственно. Введение наночастиц алмаза привело к увеличению содержания цинка и кальция в сплаве до 4.7 и 1.3 мас. % соответственно. Более высокое содержание кальция и цинка в сплаве, содержащем наноалмаз, может быть связано с меньшим угаром легирующих компонентов в процессе литья с использованием лигатуры Mg–наноалмаз.

Таблица 1

Химический состав сплавов

Сплав	Mg	Zn	Ca	Si	Al	Fe
Mg–Ca–Zn	94.7 ± 0.06	4 ± 0.07	1 ± 0.02	0.12 ± 0.01	0.04 ± 0.05	0.03 ± 0.01
Mg–Ca–Zn– наноалмаз	93.6 ± 0.05	4.7 ± 0.07	1.3 ± 0.04	0.17 ± 0.04	0.02 ± 0.01	0.02 ± 0.01

Исследования микроструктуры полученных сплавов методом оптической микроскопии (рис. 1) показали, что введение наночастиц алмаза приводит к уменьшению значения среднего размера зерна со 100 ± 36 мкм для Mg–Ca–Zn до 64 ± 17 мкм для Mg–Ca–Zn–наноалмаз и получению более однородного распределение зерен в магниевом сплаве. Предположительно, это связано с формированием новых фаз мелкодисперсных частиц, таких как Mg_2Ca . Данные результаты подтверждают, что нахождение в расплаве частиц малого размера оказывает влияние на размеры зерен. Это связано с тем, что в процессе кристаллизации наночастицы сдерживают рост зерен, и тем самым структура модифицируется [12]. Таким образом, увеличение содержания кальция обеспечило образование новой фазы, которая выступила в качестве центра зарождения кристаллов, а введение наночастиц алмаза обеспечило сдерживание роста по границам зерен.

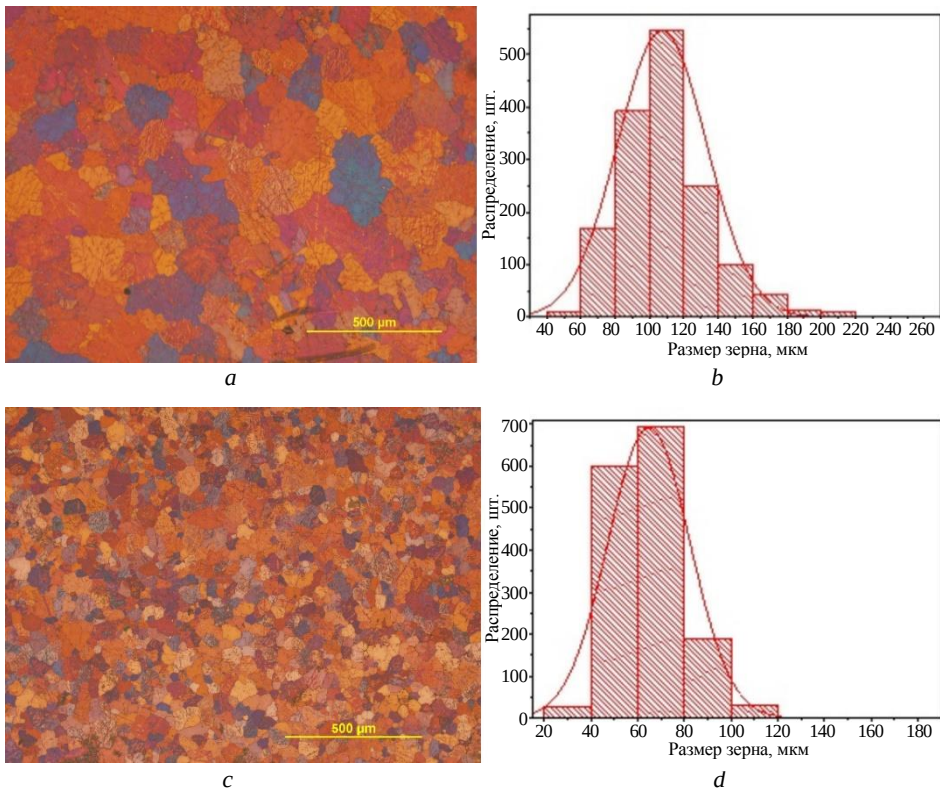


Рис. 1. Оптические изображения структуры магниевых сплавов в поляризованном свете (a, c) и гистограммы распределения зерен по размерам (b, d): a, b – Mg–Ca–Zn, c, d – Mg–Ca–Zn–наноалмаз

Fig. 1. Optical images of the structure of magnesium alloys in polarized light (a, c) and grain size distribution histograms (b, d): a, b – Mg–Ca–Zn, c, d – Mg–Ca–Zn–nanodiamond

Исходный сплав имеет поры размером до 50 мкм, при этом пористость составила 5% (см. рис. 1, a, b). Введение наночастиц алмаза позволило снизить размер пор до 15 мкм, пористость составила 3% (см рис. 1, c, d). Такой результат связан

с процессом абсорбирования углеродными материалами растворенных в расплаве газов, которые после реакции удаляются из расплава в виде шлака.

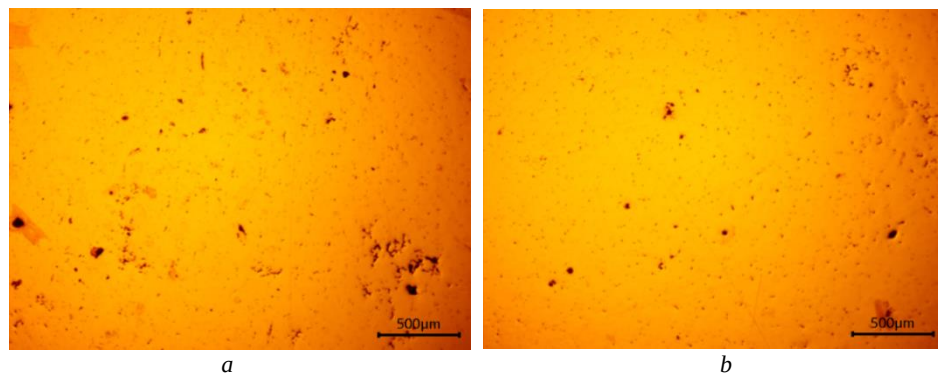


Рис. 2. Оптические изображения магниевых сплавов:
a – Mg–Ca–Zn, *b* – Mg–Ca–Zn–наноалмаз

Fig. 2. Optical images of magnesium alloys: *a* – Mg–Ca–Zn, *b* – Mg–Ca–Zn–nanodiamond

Исследование механических свойств

Твердость исходного сплава Mg–Ca–Zn составила 54 ± 3 HB. Введение наночастиц алмаза не привело к изменению твердости сплава Mg–Ca–Zn, она составила 52 ± 2 HB. По всей видимости, наночастицы алмаза не оказывают влияния на твердость сплава Mg–Ca–Zn из-за малого объемного содержания частиц, которое составляет 0.00007 об. %, и равномерного распределения упрочняющих частиц алмаза в составе сплава Mg–Ca–Zn.

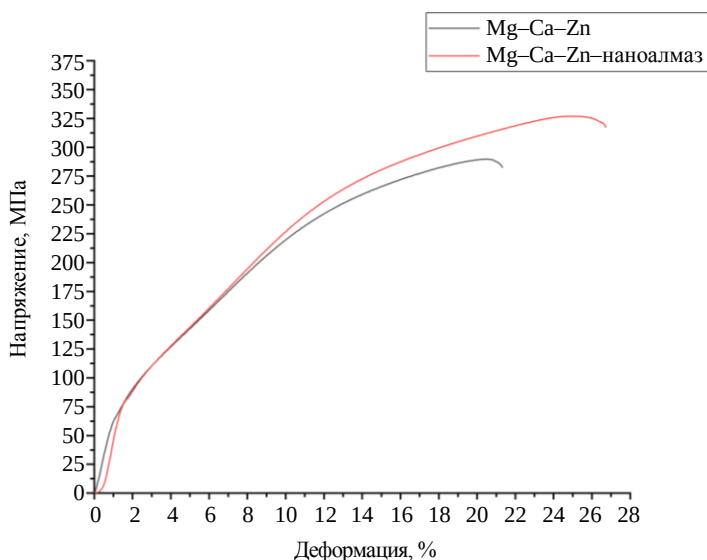


Рис. 3. Диаграммы сжатия магниевых сплавов

Fig. 3. Compression diagrams of magnesium alloys

Результаты экспериментов по сжатию в виде диаграмм напряжение–деформация представлены на рис. 3. Испытания на сжатие показали, что введение наночастиц алмаза способствует увеличению предела текучести ($\sigma_{0.2}$), предела прочности (σ_B) и пластичности (δ) сплава Mg–Ca–Zn. Исследование экспериментальных данных показало, что введение наночастиц алмаза приводит к увеличению предела текучести сплава с 66 ± 2 до 75 ± 2 МПа, предела прочности – с 294 ± 9 до 332 ± 4 МПа, максимальной деформации – с 22 ± 5 до $27 \pm 9\%$. Интервалы достоверности, являющиеся среднеквадратичным отклонением, характеризуют разброс экспериментальных данных, полученных на образцах, изготовленных из отливок одной партии.

По полученным результатам можно сделать вывод о том, как влияет средний размер зерна на параметры прочности и пластичности сплава: чем меньше средний размер зерна, тем выше прочностные характеристики и пластичность. Увеличение значения предела текучести сплава Mg–Ca–Zn после введения наноалмаза является результатом измельчения зерна сплава по закону Холла–Петча, который напрямую влияет на увеличение предела текучести материала. Вероятно, эффект одновременного упрочнения и улучшения пластичности магниевого сплава с добавлением наночастиц алмаза обусловлен равномерным деформированием материала и формированием однородной структуры по всему объему образцов. Подобный результат согласуется с ранее проведенными работами с использованием других наночастиц в магниевых [13] и алюминиевых сплавах [14, 15].

Заключение

Установлено, что для сплава Mg–Ca–Zn средний размер зерна составляет 100 ± 36 мкм. Введение наночастиц алмаза привело к снижению среднего размера зерна до 64 ± 17 мкм. Показано, что частицы распределены в структуре полученных сплавов равномерно благодаря обработке внешними полями при введении нанопорошка алмаза в расплав. Уменьшение среднего размера зерна во всем объеме отливок сплава Mg–Ca–Zn свидетельствует о равномерном распределении наночастиц алмаза, выступающих в роли инокуляторов при кристаллизации.

Выявлено, что введение частиц наноалмаза приводит к увеличению предела текучести с 66 до 75 МПа, предела прочности – с 294 до 332 МПа, максимальной деформации до разрушения сплава – с 22 до 27%.

Список источников

1. Hedayati R., Ahmadi S.M., Lietaert K., Tümer N., Li Y., Amin Yavari S., Zadpoor A.A. Fatigue and quasi-static mechanical behavior of bio-degradable porous biomaterials based on magnesium alloys // *Journal of Biomedical Materials Research: A*. 2018. V. 106 (7). P. 1798–1811. doi: 10.1002/jbm.a.36380
2. Sanz-Herrera J.A., Reina-Romo E., Boccaccini A.R. In silico design of magnesium implants: macroscopic modeling // *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2018. V. 79. P. 181–188. doi: 10.1016/j.jmbbm.2017.12.016
3. Chino Y., Kobata M., Iwasaki H., Mabuchi M. Tensile Properties from Room Temperature to 673 K of Mg-0.9 mass% Ca Alloy // *Materials Transactions*. 2002. V. 43 (10). P. 2643–2646. doi: 10.2320/matertrans.43.2643

4. Meyer G., Caneiro A., Corso H., Ponce V., Azcona A. El Centro Atómico Bariloche y la Tecnología del Hidrógeno. Centro atomico de Bariloche, 2004.
5. Lü L., Lai M.O. Mechanical Alloying. Boston : Kluwer Academic Publishers, 1998.
6. Cha P.R., Han H.S., Yang G.F., Kim Y.C., Hong K.H., Lee S.C., Jung J.Y., Ahn J.P., Kim Y.Y., Cho S.Y., Byun J.Y., Lee K.S., Jung S.J., Seo H.K. Biodegradability engineering of biodegradable Mg alloys: Tailoring the electrochemical properties and microstructure of constituent phases // Scientific Reports. 2013. V. 3 (28). P. 2367–2375. doi: 10.1038/srep02367
7. Luo A., Pekguleryuz M.O. Cast magnesium alloys for elevated temperature applications // Journal of Materials Science. 1994. V. 29 (20). P. 5259–5271. doi: 10.1007/BF01171534
8. Peng T., Xuanyong L. Surface modification of biodegradable magnesium and its alloys for biomedical applications // Regenerative Biomaterials. 2015. V. 2. P. 135–151. doi: 10.1093/rb/rbu013
9. Кахидзе Н.И., Хрусталёв А.П., Ворожцов А.Б. Физико-механические свойства дисперсно-упрочненных сплавов системы алюминий–магний // Новые материалы и перспективные технологии : сб. материалов Пятого междисциплинарного научного форума с междунар. участием. М. : Интеллектуальные системы, 2019. С. 630–631.
10. Zhang Q., Mochalin V., Neitzel I., Knoke I., Han J., Klug C., Zhou J.G., Lelkes P., Gogotsi Y. Fluorescent PLLA-nanodiamond composites for bone tissue engineering // Biomaterials. 2011. V. 32 (1). P. 87–94. doi: 10.1016/j.biomaterials.2010.08.090
11. Красновейкин В.А., Скрипняк В.А., Козулин А.А. Численное моделирование процессов интенсивной пластической деформации тел при динамическом канальном прессовании // Известия вузов. Физика. 2012. Т. 55, № 9-3. С. 67–71.
12. Vorozhtsov S., Minkov L., Dammer V., Khrustalyov A., Zhukov I., Promakhov V., Khmeleva M. Ex situ introduction and distribution of nonmetallic particles in aluminum melt: Modeling and experiment // JOM. 2017. V. 69. P. 2653–2657. doi: 10.1007/s11837-017-2594-1
13. Mehranpour M., Heydarinia A., Emamy M., Mirzadeh H., Koushki A., Razi R. Enhanced mechanical properties of AZ91 magnesium alloy by inoculation and hot deformation // Materials Science and Engineering: A. 2021. V. 802. P.140667-1–140667-8. doi: 10.1016/j.msea.2020.140667.
14. Khrustalyov A.P., Garkushin G.V., Zhukov I.A., Razorenov S.V., Vorozhtsov A.B. Quasi-Static and Plate Impact Loading of Cast Magnesium Alloy ML5 Reinforced with Aluminum Nitride Nanoparticles // Metals. 2019. V. 9 (6). P. 715. doi: 10.3390/met9060715
15. Promakhov V.V., Khmeleva M.G., Zhukov I.A., Platon V.V., Khrustalyov A.P., Vorozhtsov A.B. Influence of Vibration Treatment and Modification of A356 Aluminum Alloy on Its Structure and Mechanical Properties // Metals. 2019. V. 9 (1). P. 87. doi: 10.3390/met9010087.

References

1. Hedayati R., Ahmadi S.M., Lietaert K., Tümer N., Li Y., Amin Yavari S., Zadpoor A.A. (2018) Fatigue and quasi-static mechanical behavior of bio-degradable porous biomaterials based on magnesium alloys. *Journal of Biomedical Materials Research Part A*. 106(7). pp. 1798–1811. DOI: 10.1002/jbm.a.36380.
2. Sanz-Herrera J.A., Reina-Romo E., Boccaccini A.R. (2018) In silico design of magnesium implants: Macroscopic modeling. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 79. pp. 181–188. doi: 10.1016/j.jmbbm.2017.12.016.
3. Chino Y., Kobata M., Iwasaki H., Mabuchi M. (2002) Tensile properties from room temperature to 673 K of Mg-0.9 mass% Ca alloy containing lamella Mg₂Ca. *Materials Transactions*. 43(10). pp. 2643–2646. doi: 10.2320/matertrans.43.2643.
4. Meyer G., Caneiro A., Corso H., Ponce V., Azcona A. (2004) El Centro Atómico Bariloche y la Tecnología del Hidrógeno. Centro atomico de Bariloche.
5. Lü L., Lai M.O. Mechanical Alloying. Boston: Kluwer Academic Publishers. 1998.

6. Cha P.R., Han H.S., Yang G.F., Kim Y.C., Hong K.H., Lee S.C., Jung J.Y., Ahn J.P., Kim Y.Y., Cho S.Y., Byun J.Y., Lee K.S., Jung S.J., Seo, H.K. (2013) Biodegradability engineering of biodegradable Mg alloys: Tailoring the electrochemical properties and microstructure of constituent phases. *Scientific reports*. 3(1). pp. 1–6. doi: 10.1038/srep02367.
7. Luo A., Pekguleryuz M.O. (1994) Cast magnesium alloys for elevated temperature applications. *Journal of materials science*. 29(20). pp. 5259–5271. doi: 10.1007/BF01171534.
8. Peng T., Xuanyong L. (2015) Surface modification of biodegradable magnesium and its alloys for biomedical applications. *Regenerative biomaterials*. 2(2). pp. 135–151. doi: 10.1093/rb/rbu013.
9. Kahidze N.I., Hrustalyov A.P., Vorozhnev A.B. (2019) Fiziko-mekhanicheskie svoystva dispersno-uprochnennykh splavov sistemy alyuminij-magnij [Physical and mechanical properties of dispersion-strengthened alloys of the aluminum-magnesium system]. *Novye materialy i perspektivnye tekhnologii*. P. 630–631.
10. Zhang Q., Mochalin V., Neitzel I., Knoke I., Han J., Klug C., Zhou J. G., Lelkes P., Gogotsi Y. (2011) Fluorescent PLLA-nanodiamond composites for bone tissue engineering. *Biomaterials*. 32(1). pp. 87–94. doi: 10.1016/j.biomaterials.2010.08.090.
11. Krasnovykin V.A., Skripnyak V.A., Kozulin A.A. (2012) Chislennoe modelirovanie processov intensivnoy plasticheskoy deformatsii tel pri dinamicheskom kanal'nom pressovanii [Numerical modeling of processes of intense plastic deformation of bodies under dynamic channel pressing.]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Fizika*. Vol. 55, No. 9–3. pp. 67–71.
12. Vorozhtsov S., Minkov L., Dammer V., Khrustalyov A., Zhukov I., Promakhov V., Khmeleva M. (2017) Ex situ introduction and distribution of nonmetallic particles in aluminum melt: modeling and experiment. *JOM*. 69(12). pp. 2653–2657. doi: 10.1007/s11837-017-2594-1.
13. Mehranpour M., Heydarinia A., Emamy M., Mirzadeh H., Koushki A., Razi R. (2021) Enhanced mechanical properties of AZ91 magnesium alloy by inoculation and hot deformation. *Materials Science and Engineering: A*. 802. pp. 140667. doi: 10.1016/j.msea.2020.140667.
14. Khrustalyov A.P., Garkushin G.V., Zhukov I.A., Razorenov S.V., Vorozhtsov A.B. (2019) Quasi-static and plate impact loading of cast magnesium alloy ML5 reinforced with aluminum nitride nanoparticles. *Metals*. 9(6). pp. 715. doi: 10.3390/met9060715.
15. Promakhov V.V., Khmeleva M.G., Zhukov I.A., Platov V.V., Khrustalyov A.P., Vorozhtsov A.B. (2019) Influence of vibration treatment and modification of A356 aluminum alloy on its structure and mechanical properties. *Metals*. 9(1). pp. 87. doi: 10.3390/met9010087.

Сведения об авторах:

Селиховкин Михаил Александрович – бакалавр физико-технического факультета Томского государственного университета, Томск, Россия. E-mail: mishselikh@gmail.com

Ахмадиева Анастасия Алексеевна – магистрант физико-технического факультета Томского государственного университета, Томск, Россия. E-mail: nas99.9@yandex.ru

Жуков Илья Александрович – кандидат технических наук, заведующий лабораторией нанотехнологий металлургии Томского государственного университета, Томск, Россия. E-mail: gofra930@gmail.com

Марченко Екатерина Сергеевна – кандидат физико-математических наук, заведующая лабораторией медицинских сплавов и имплантатов с памятью формы Томского государственного университета, Томск, Россия. E-mail: 89138641814@mail.ru

Хрусталёв Антон Павлович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории нанотехнологий металлургии Томского государственного университета, Томск, Россия. E-mail: tofik0014@gmail.com

Information about the authors:

Selikhovkin Mikhail A. (Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: mishselikh@gmail.com

Akhmadieva Anastasia A. (Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: nas99.9@yandex.ru

Zhukov Il'ya A. (Candidate of Technical Sciences, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: gofra930@gmail.com

Marchenko Ekaterina S. (Candidate of Physics and Mathematics, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: 89138641814@mail.ru

Khrustalev Anton P. (Candidate of Physics and Mathematics, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: tofik0014@gmail.com

Статья поступила в редакцию 31.05.2022; принята к публикации 03.10.2022

The article was submitted 31.05.2022; accepted for publication 03.10.2022