

**THE INFLUENCE OF GRAIN SIZE ON THE CORROSION CHARACTERISTICS
OF ZX10 BIODEGRADABLE MAGNESIUM ALLOY IN HANKS' SOLUTION**

*Pavel Nikolaevich Myagkikh ^a, Evgeniy Dmitrievich Merson, Vitaliy Aleksandrovich Poluyanov,
Alexandr Alexandrovich Sergeev, Dmitriy Lvovich Merson*

Togliatti State University, 14 Belorusskaya st. 14, 445020 Togliatti, Russia

^a feanorhao@gmail.com

ABSTRACT

Magnesium alloys have long been a focus of aircraft designers due to their light weight and high strength. A relatively new application for magnesium alloys is self-dissolving (biodegradable) medical implants. Such implants do not require repeat surgery for their removal, which means reduced risks to the patient's health and a shorter recovery period. Since resorption in the human body is essentially a corrosive process, it is the corrosion characteristics that are the subject of detailed study. This paper examines the corrosion properties, such as the depth of corrosion damage, corrosion rate, and the stages of passivation film formation, of ZX10 alloy with different grain sizes: coarse-grained (as cast) and fine-grained (extruded). It was found that grain refinement contributes to a decrease in the corrosion rate, most likely due to the formation of a more continuous passivation film. Furthermore, damage on coarse-grained material is deeper and covers a significantly larger area compared to fine-grained material.

KEYWORDS

Biodegradable materials; magnesium alloys; ZX10 alloy; corrosion. Low-carbon steels; decomposition of supercooled austenite; thermokinetic diagrams; microstructure; seamless pipes.

**ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА ЗЕРНА НА ОСОБЕННОСТИ КОРРОЗИОННОГО
ПРОЦЕССА БИОРЕЗОРБИРУЕМОГО СПЛАВА ZX10 В РАСТВОРЕ ХЭНКСА**

*Павел Николаевич Мягких ^a Евгений Дмитриевич Мерсон, Виталий Александрович Полуянов,
Александр Александрович Сергеев, Дмитрий Львович Мерсон*

Тольяттинский государственный университет, Россия, 445020 Тольятти, ул. Белорусская, 14

^a feanorhao@gmail.com

АННОТАЦИЯ

Магниевого сплавы долгое время были в фокусе внимания авиаконструкторов за счет их малого веса и высокой удельной прочности. Относительно новое применение магниевых сплавов – саморастворяющиеся (биорезорбируемые) медицинские имплантаты. Такие имплантаты

не требуют повторной операции по их извлечению, что означает пониженные риски для здоровья пациента и меньший период реабилитации. Поскольку резорбция в человеческом теле является по сути коррозионным процессом именно коррозионные характеристики являются объектом детального изучения. В данной работе рассмотрены коррозионные свойства, такие как глубина коррозионных повреждений, скорость коррозии и стадийность формирования пассивирующей пленки сплава ZX10 с различным размером зерна: в крупнозернистом (литом) и мелкозернистом (экструдированном) состояниях. Было выявлено, что уменьшение размера зерна способствует снижению скорости коррозии, вероятнее всего за счет формирования более сплошной пассивирующей пленки. Также повреждения на крупнозернистом материале более глубокие и покрывают существенно большую площадь, по сравнению с мелкозернистым материалом.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Биорезорбируемые материалы; магниевые сплавы; сплав ZX10; коррозия.

Введение

Идея создания хирургических имплантатов, таких как пластины для челюстно-лицевой хирургии и винты для остеосинтеза долгое время обсуждалась в научном сообществе. Такие медицинские изделия позволяли бы не проводить операцию по извлечению имплантата после завершения процесса заживления, что в свою очередь давало бы много преимуществ: отсутствие дополнительных рисков для здоровья пациента, меньший период реабилитации, снижение нагрузки на врачей-хирургов и т.д. Основная проблема данной области носит материаловедческий характер, исследователи со всего мира предлагают свои решения по материалам для данных изделий: биорезорбируемые полимеры и полимерные композиты [1], различные виды керамики [2], а также металлические материалы на основе железа [3, 4], цинка [5, 6] или магния [7, 8]. Среди металлических материалов именно магниевые сплавы на данный момент уже коммерчески применяются для изготовления биорезорбируемых хирургических имплантатов.

Использование в столь ответственном приложении, как хирургические имплантаты, предъявляет повышенные требования к надежности изделия, поскольку выход его из строя не только потребует повторной операции по замене имплантата, но и может

нести серьезные риски получения пациентом травмы. В этой связи первостепенную роль играют коррозионные характеристики материала: даже если материал достаточно прочный, следует учитывать, что в процессе резорбции, во-первых, уменьшается живое сечение изделия, а во-вторых, образуются концентраторы напряжений – коррозионные язвы. Поэтому скорость коррозии (резорбции) материала, а также глубина и величина образующихся в нем язв являются важнейшими показателями для оценки потенциальной возможности выхода изделия из строя.

Известно, что скорость коррозии материала и морфология коррозионных повреждений в значительной мере зависят от совокупности различных факторов. Множество работ демонстрируют существенную зависимость этих характеристик от размера зерна [9–11], однако это далеко не единственный определяющий фактор. Не менее важным является и присутствие в сплаве частиц вторых фаз: в подавляющем большинстве случаев эти фазы имеют электродный потенциал более положительный, чем у матричного металла [12, 13], а значит ввиду гальванического эффекта будут провоцировать интенсивное электрохимическое растворение матрицы вокруг себя [14]. Наконец, существенную роль играет и кристаллографическая текстура материала: многократно было доказано, что зерна разных кристаллографических

ориентаций имеют разную коррозионную стойкость [15, 16]. В этой связи для дизайна изделий из магниевых биорезорбируемых сплавов необходимо полное представление о влиянии каждого фактора на коррозионные свойства материала и, соответственно, надежность конечного продукта.

В данной работе рассмотрен биорезорбируемый магниевый сплав ZX10 в двух различных состояниях с целью определить влияние размера зерна и других структурообразующих факторов на скорость коррозии, а также глубину язв и процент пораженной локализованной коррозией поверхности, в условиях, имитирующих условия человеческого тела.

1. Материалы и методика

В работе использовался коммерчески применяемый для изготовления биорезорбируемых имплантатов сплав ZX10, химический состав сплава, определенный при помощи оптико-эмиссионного спектрометра Thermo Fisher Scientific ARL 4460, приведен в табл. 1.

Материал использовался в двух состояниях: крупнозернистом (литом) и мелкозернистом (экструдированном) состояниях. Для получения мелкозернистой структуры слитки обтачивали до диаметра 60 мм и длины 120 мм и подвергали экструзии по прямой схеме при температуре 320 °С, скорости 0,3 мм/с и коэффициенте экструзии 25:1 для получения прутков диаметром 12 мм. Материалы предварительно исследовались при помощи сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС) и атомно-силовой микроскопии зонда Кельвина (АСМЗК).

Из сплавов изготавливали плоские образцы в виде диска Ø10 мм, поверхность которых с одной стороны шлифовалась на наждачной бумаге с размером абразива #2500, полировалась на безводных алмазных суспензиях 3 мкм, 1 мкм и 0,25 мкм, а затем протравливалась в потоке ионизированного аргона в установке для ионной полировки Hitachi IM 4000 plus. В случае экструдированного материала образец вырезался поперек оси прутка.

Для коррозионных испытаний образцы помещали в ячейку по аналогии с [17], с той разницей, что над образцом устанавливалась не бюретка, а камера для видеосъемки, и регистрация потенциала открытой цепи и акустической эмиссии не проводилась. Испытания включали в себя выдержку в течение 14 суток в растворе Хэнкса при поддержании температуры 37 ± 1 °С, уровня pH $7,4 \pm 0,1$ (метод коррекции – автоматическое барботирование углекислотой по аналогии с [18]) и постоянной циркуляции раствора.

После испытания с образцов удалялись продукты коррозии выдержкой в водном растворе $20\% \text{CrO}_3 + 1\% \text{AgNO}_3$ в ультразвуковой ванне, затем они промывались этиловым спиртом и производилось определение скорости коррозии гравиметрическим методом, а затем поверхность образца снималась на конфокальном лазерном сканирующем микроскопе (КЛСМ) Olympus LEXT для определения глубины коррозионных повреждений. Также по снимкам с КЛСМ производился подсчет процентной доли поверхности, пораженной локализованной коррозией, площадь панорамы для подсчета составляла 50 мм^2 .

Таблица 1. Химический состав сплава ZX10

Table 1. Chemical composition of ZX10 alloy

Mg	Zn	Ca	Fe	Cu	Ni	Mn	Al	Zr	Si
Base	1,241	0,104	0,0037	<0,001	<0,001	0,0014	0,0122	<0,001	0,001

2. Результаты

Структуры обоих материалов представлены на рис. 1 и 2 соответственно. Средний размер зерна составил 350 ± 28 мкм для литого сплава и 35 ± 6 мкм для сплава после экструзии. В структуре литого материала присутствуют 2 типа частиц. Первый тип – частицы «тройной» эвтектической фазы (вероятнее всего $\text{Ca}_2\text{Mg}_6\text{Zn}_3$), представляющие собой светлые сферы с темными вкраплениями. Второй – темные в InLens-контрасте частицы, богатые кальцием. Детально оба типа частиц описаны в работе [19]. Частицы тройной фазы (рис. 3) имеют более положительный по отношению к матрице потенциал и очень часто соседствуют с частицами примесей: на рис. 3 показаны случаи соседства с частицей оксида магния, оксида кремния, а также некоего интерметаллида. Вероятно, эти частицы в расплаве являются центрами кристаллизации для эвтектической фазы. Интересен факт, что интерметаллид на рис. 3 несмотря на наличие в составе никеля, алюминия и железа имеет резко отрицательный относительно магния электродный потенциал. Такое возможно, поскольку в значитель-

ной мере на электродный потенциал материала влияет его кристаллическая решетка. Темные частицы (рис. 4) имеют электродный потенциал сравнимый с потенциалом матрицы или чуть более отрицательный. Вероятно, это частицы фазы Mg_2Ca .

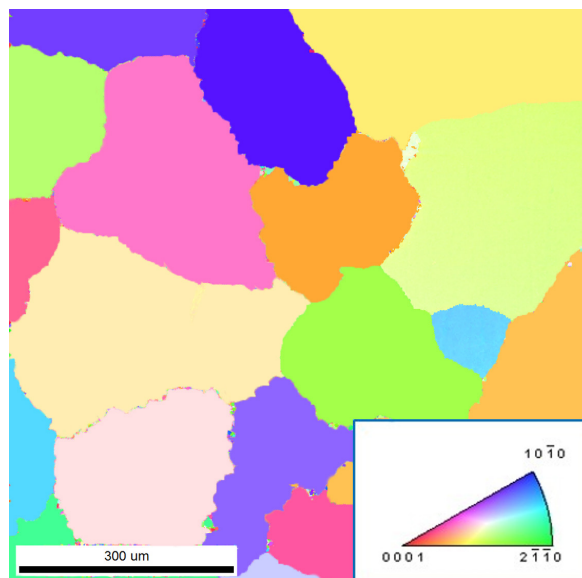


Рис. 1. Карта кристаллографических ориентаций зерен в цветах обратной полюсной фигуры, полученная методом EBSD-анализа литого материала

Fig. 1. Inverse pole figure (IPF) map obtained by EBSD-analysis of as-cast material

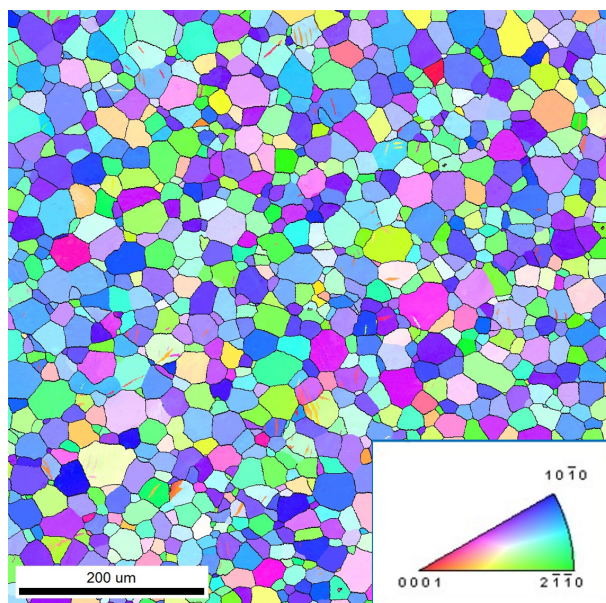


Рис. 2. Карта кристаллографических ориентаций зерен в цветах обратной полюсной фигуры, полученная методом EBSD-анализа экструдированного материала

Fig. 2. Inverse pole figure (IPF) map obtained by EBSD-analysis of extruded material

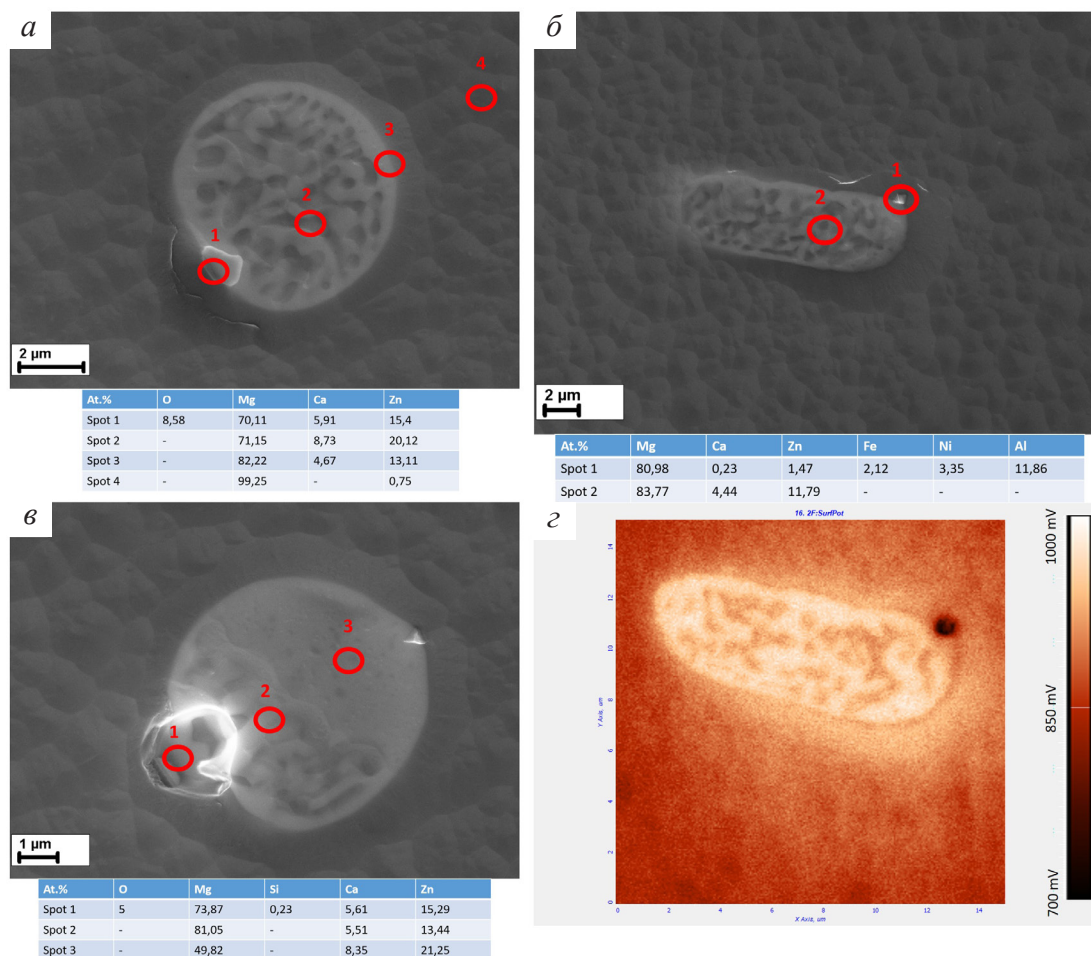


Рис. 3. Снимки (СЭМ) и элементный состав (EDS) частиц эвтектической фазы, образовавшихся на частицах оксида магния (а), интерметаллидной частицы сложного состава (б) и оксида кремния (в) в литом материале. На рис. 3, г приведена карта электродных потенциалов (АСМЗК) для интерметаллидной частицы, изображенной на рис. 3, б

Fig. 3. Images (SEM) and elemental composition (EDS) of eutectic phase particles originated at magnesium oxide particles (a), intermetallic particle of complex composition (б) and silicon oxide (в) in the as-cast material. Fig. 3, г shows an electrode potential map (SKPFM) for the intermetallic particle shown in Fig. 3, б

В экструдированном материале также были обнаружены «темные» частицы (рис. 5), однако, их электродный потенциал положителен относительно магниевой матрицы. На данном этапе исследований не было установлено, являются ли эти темные частицы той же фазой, что и частицы, обнаруженные в литом материале.

На рис. 6 и 7 приведены раскадровки, полученные при помощи видеосъемки во время коррозионных испытаний, а также фотографии и карты высот, полученные после удаления продуктов коррозии при помощи КЛСМ. В первые 72 часа на поверхности

обоих материалов видны светлые округлые участки вокруг частиц вторых фаз и примесных включений. Подробно явление формирования этих участков рассмотрено в работе [20]. После недели коррозионных испытаний у экструдированного материала эти участки исчезают, а у литого – остаются. После двух недель испытаний на обоих материалах видна серая пассивирующая пленка. Результаты КЛСМ показывают, что у литого материала существенно больше как площадь коррозионных повреждений, так и глубина язв. В табл. 2 представлены количественные коррозионные характеристики.

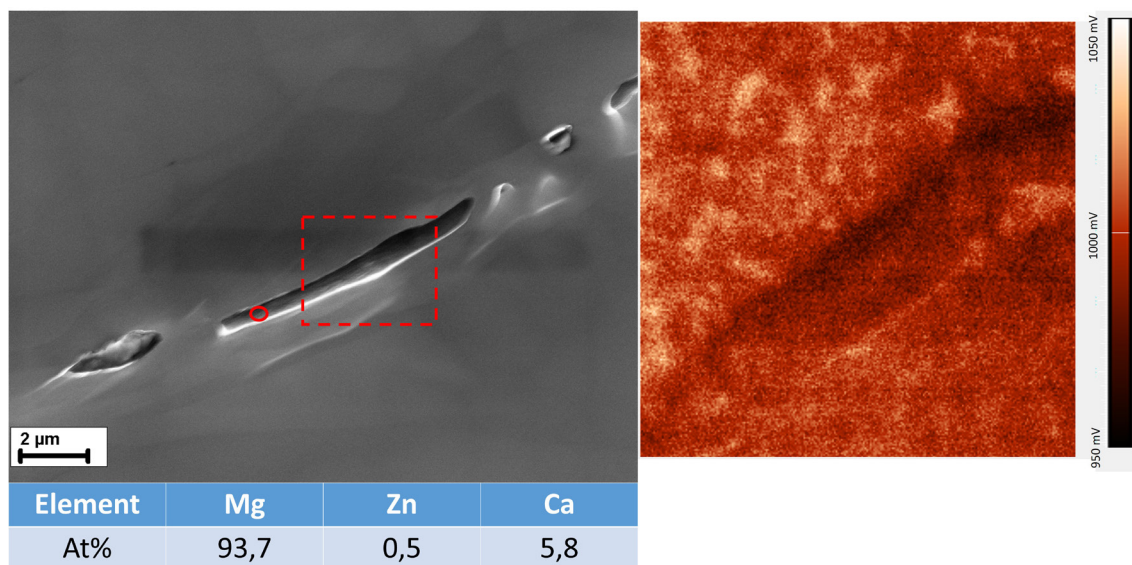


Рис. 4. Снимок (СЭМ), химический состав (ЭДС, показано точкой на СЭМ снимке) и карта электродных потенциалов (АСМЗК, показано пунктиром на СЭМ снимке) частицы с темным контрастом в литом материале

Fig. 4. An image (SEM), chemical composition (EDS, indicated by a point on the SEM image), and an electrode potential map (SKPFM, indicated by a dashed line on the SEM image) of a particle with dark contrast in the cast material

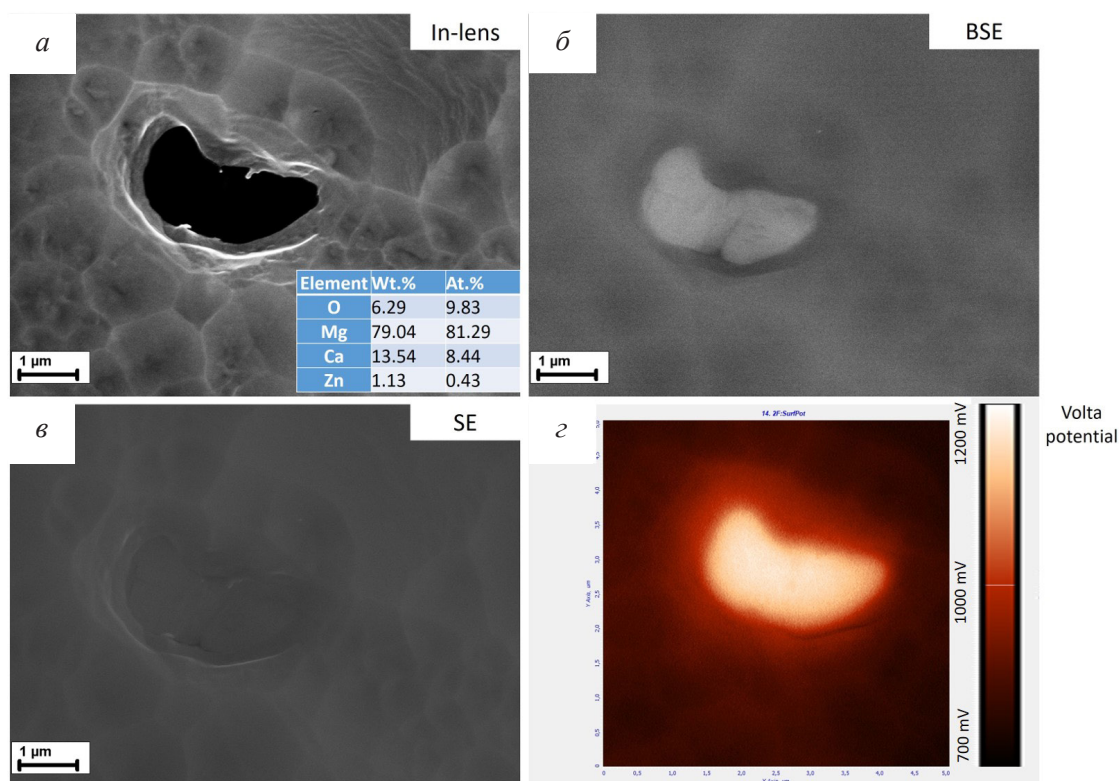


Рис. 5. Частица второй фазы в экструдированном сплаве на снимках, полученных при помощи СЭМ с использованием In-lens (а), BSE (обратно-отраженные электроны) (б) и SE (вторичные электроны) (в) детекторов, а также АСМЗК (г)

Fig. 5. A second-phase particle in the extruded alloy in images obtained using an In-lens detector (a), a BSE (backscattered electrons) detector (b), and an SE (secondary electrons) detector (c), as well as SKPFM (d)

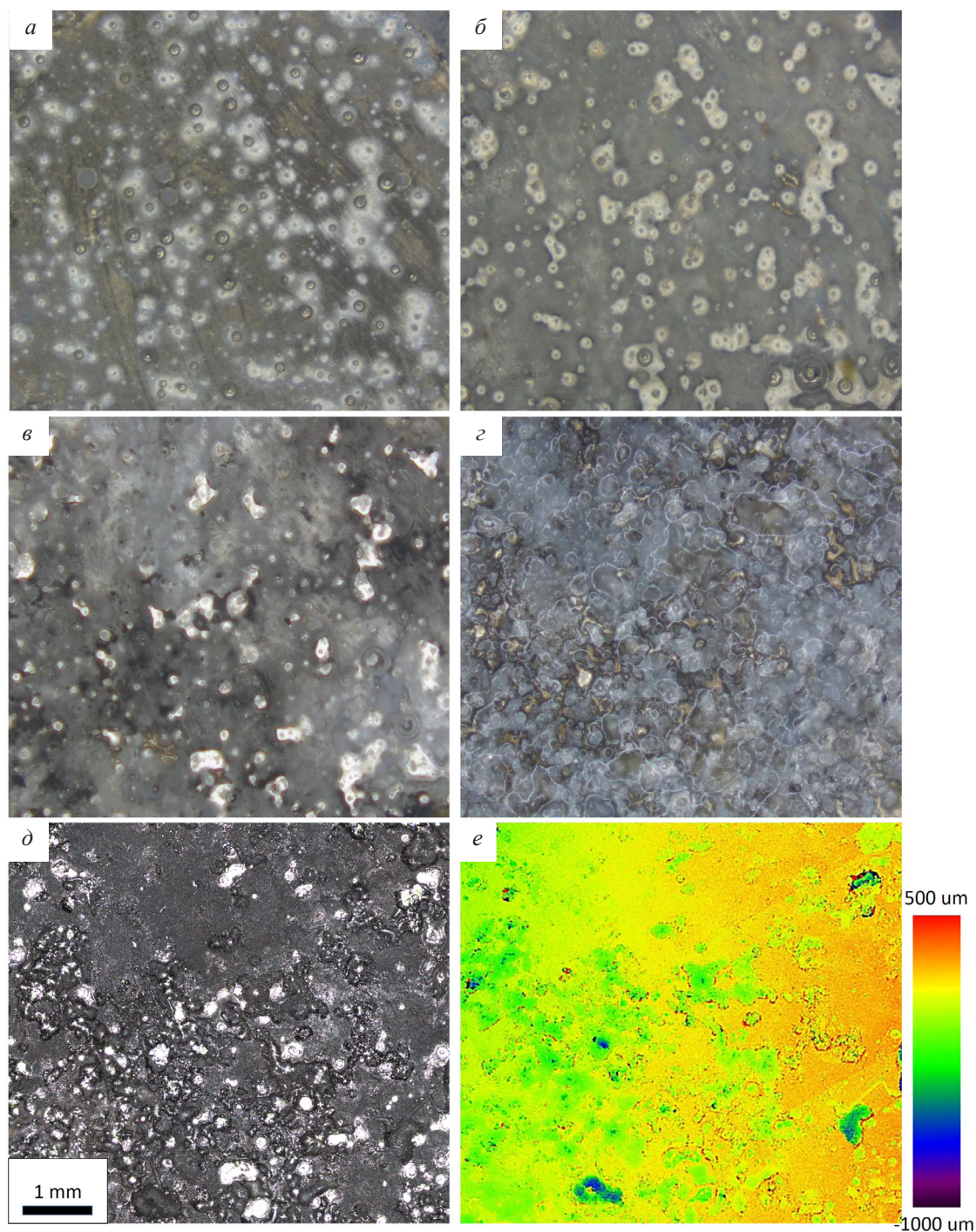


Рис. 6. Поверхность образца в литом состоянии, корродировавшего в течение 24 (а), 72 (б), 168 (в) и 336 ч (г-е). Снимки (а-г) получены при помощи видео-камеры непосредственно во время нахождения образца в коррозионном растворе. Изображения (д, е) представляют, соответственно, оптическое изображение и карту высот, полученные при помощи КЛСМ с одной и той же области образца после его извлечения из коррозионного раствора и удаления продуктов коррозии

Fig. 6. The surface of the as-cast sample after corrosion for 24 h (a), 72 h (b), 168 h (c), and 336 h (d-e). Images (a-c) were captured using a video camera directly while the sample was in the corrosion solution. Images (d, e) show, respectively, an optical image and a height map, obtained via CLSM from the same area of the sample after its extraction from the corrosion solution and removal of corrosion products

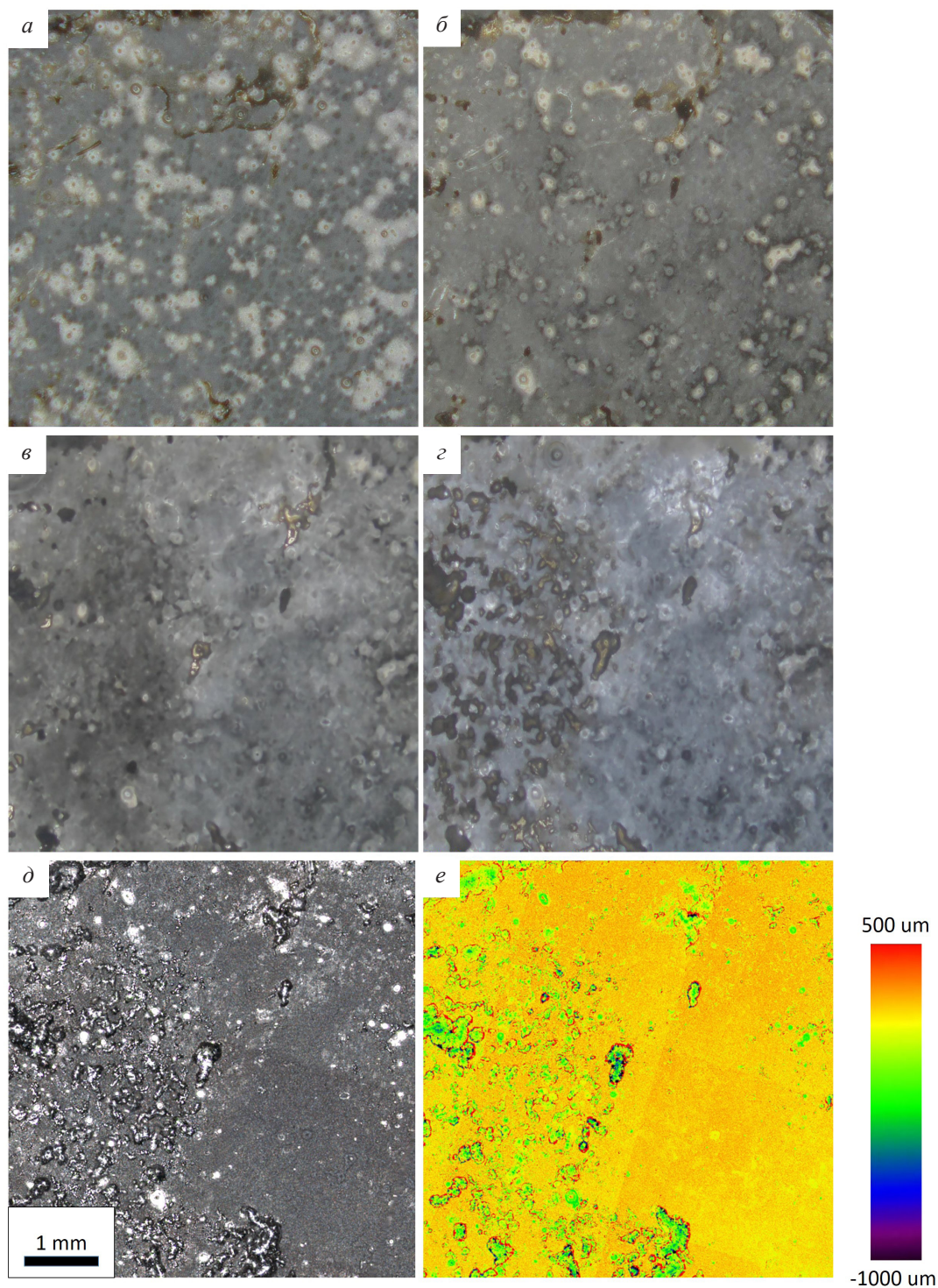


Рис. 7. Поверхность образца в экструдированном состоянии, корродировавшего в течение 24 (а), 72 (б), 168 (в) и 336 ч (г–е). Снимки (а–г) получены при помощи видео-камеры непосредственно во время нахождения образца в коррозионном растворе. Изображения (д, е) представляют, соответственно, оптическое изображение и карту высот, полученные при помощи КЛСМ с одной и той же области образца после его извлечения из коррозионного раствора и удаления продуктов коррозии

Fig. 7. The surface of the extruded sample after corrosion for 24 h (a), 72 h (б), 168 h (в), and 336 h (г–е). Images (a–г) were captured using a video camera directly while the sample was in the corrosion solution. Images (д, е) show, respectively, an optical image and a height map, obtained via CLSM from the same area of the sample after its extraction from the corrosion solution and removal of corrosion products

Таблица 2. Коррозионные характеристики

Table 2. Corrosion properties

Материал / Material	Скорость коррозии (мм/год) / Corrosion rate (mm/y)	Максимальная глубина коррозионных язв (мкм) / Maximum depth of corrosion pits (μm)	Площадь язвенных повреждений (% от общей площади съемки) / Area of pitting damage (% of entire imaging area)
Литой / As-cast	1,4±0,2	672	36±11
Экструдированный / Extruded	0,8±0,1	211	14±6

3. Обсуждение

Благодаря экструзии происходит существенное (фактически на порядок) уменьшение размера зерна, а также значительное снижение скорости коррозии, максимальной глубины язв и занятой ими площади поверхности образца. Для того, чтобы сформулировать вывод, насколько эти улучшения коррозионной стойкости связаны с измельчением зерна следует рассмотреть остальные структурообразующие факторы.

Как видно из результатов EBSD-анализа, в ходе экструзии материал приобрел ярко выраженную кристаллографическую текстуру: в поперечном сечении прутка явно преобладают зерна с призматической и пирамидальной ориентацией, тогда как зерен с базисной ориентацией практически нет. В работе [16] были проведены коррозионные испытания на монокристаллах магния, показавшие, что максимальную коррозионную стойкость демонстрирует именно базисная плоскость. Призматические и пирамидальные оказались менее стойкими, кроме того, кристаллиты с призматической ориентацией склонны к язвенным повреждениям. Исходя из этого можно предположить, что текстурирование в данном случае должно было произвести скорее отрицательный эффект на коррозионную стойкость.

Применение метода зонда Кельвина позволило выявить, что в литом материале присутствуют частицы с потенциалом, как более положительным (тройная фаза), так и немно-

го более отрицательным (темные частицы), относительно матрицы. В экструдированном же материале были обнаружены темные частицы с существенно более положительным потенциалом, чем у матрицы. С точки зрения электрохимии более отрицательные относительно матрицы частицы должны растворяться в первую очередь сами, ингибируя таким образом растворение матричного материала. Таким образом отрицательные частицы защищают основной материал, а их наличие должно приводить к снижению скорости коррозии. Более положительные же частицы напротив: провоцируют интенсивное растворение матрицы, сами не подвергаясь разрушению ввиду гальванического эффекта, поэтому их наличие должно увеличивать скорость коррозии. Игрет роль и разность потенциалов между частицей и матрицей: в экструдированных сплавах между темными частицами и матричным металлом эта величина составляет 0,4–0,5 В, тогда как разность между матрицей и частицами тройной фазы в литом материале всего 0,1–0,2 В. Резюмируя, в литом материале содержатся частицы, как ускоряющие, так и замедляющие коррозию матричного металла, в то время, как в экструдированном наблюдаются только частицы, которые должны значительно ускорять этот процесс. Таким образом, можно заключить, что изменения, происходящие с частицами вторых фаз в ходе экструзии, должны негативно влиять на коррозионные характеристики.

Таким образом, и произошедшее в результате экструзии кристаллографическое текстурирование материала, и изменения, касающиеся частиц вторых фаз, исходя из полученных данных должны были снизить коррозионную стойкость материала, чего не произошло – напротив, материал после экструзии стал существенно менее восприимчивым к агрессивным средам. Это указывает на то, что основной вклад в увеличение коррозионной стойкости материала внесло именно измельчение зерна. Если же затрагивать механизм увеличения коррозионной стойкости при экструзии, то вероятно, он связан с ускоренным образованием пассивирующей пленки на поверхности: через 7 дней на поверхности литого материала все еще видны светлые округлые зоны вокруг частиц, образовавшиеся в самом начале эксперимента, тогда как на поверхности экструдированного их нет – она затянута серой пассивирующей пленкой продуктов коррозии.

Выводы

1. Скорость коррозии, максимальная глубина язв и площадь язвенных поражений для экструдированного материала оказались существенно меньше, чем для литого.

2. Изменения, происходящие с материалом в ходе экструзии и касающиеся кристаллографического текстурирования и частиц вторых фаз, по результатам исследований с применением EBSD-анализа и атомно силовой микроскопии зонда Кельвина, должны не повышать, а наоборот снижать коррозионную стойкость материала. Таким образом, можно сделать вывод, что основной положительный эффект на коррозионные характеристики оказывает измельчение зерна.

3. Исходя из результатов видеонаблюдения наиболее вероятно, что снижение скорости коррозии экструдированного материала достигается за счет более быстрого образования пассивирующей пленки.

Благодарности / Acknowledgments

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, проекты 23-19-00636 (данные

коррозионных испытаний) и 23-23-10041 (исследования структуры).

Financial support from the Russian Science Foundation through the grant-in-aid No. 23-19-00636 (corrosion testing data) and No. 23-23-10041 (structure investigation) is gratefully appreciated.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. I. Antoniac, D. Popescu, A. Zapciu, A. Antoniac, F. Miculescu, H. Moldovan, Magnesium filled polylactic acid (PLA) material for filament based 3D printing, Materials (Basel). 12 (2019) 1–13. <https://doi.org/10.3390/ma12050719>.
2. H. Teramoto, A. Kawai, S. Sugihara, A. Yoshida, H. Inoue, Resorption of Apatite-wollastonite containing glass-ceramic and β -tricalcium phosphate in vivo, Acta Med. Okayama. 59 (2005) 201–207. <https://doi.org/10.18926/AMO/31974>.
3. M. Schinhammer, A.C. Hänzli, J.F. Löffler, P.J. Uggowitzer, Design strategy for biodegradable Fe-based alloys for medical applications, Acta Biomater. 6 (2010) 1705–1713. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2009.07.039>.
4. T. Kraus, F. Moszner, S. Fischerauer, M. Fiedler, E. Martinelli, J. Eichler, F. Witte, E. Willbold, M. Schinhammer, M. Meischel, P.J. Uggowitzer, J.F. Löffler, A. Weinberg, Biodegradable Fe-based alloys for use in osteosynthesis: Outcome of an in vivo study after 52 weeks, Acta Biomater. 10 (2014) 3346–3353. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2014.04.007>.
5. E.I. Fakhretdinova, E.D. Khafizova, R.N. Asfandiyarov, G.I. Raab, R.K. Islamgaliev, A.S. Semenov, The study of influence of temperature and speed conditions on the mechanical properties of bioresorbable Zn–4Ag–Cu zinc alloy during equal-channel angular pressing, Front. Mater. Technol. (2022) 68–78. <https://doi.org/10.18323/2782-4039-2022-3-2-68-78>.
6. E.D. Khafizova, R.K. Islamgaliev, E.I. Fakhretdinova, H. Yilmazer, M. V Polenok, Biodegradable metallic materials for medicine, Mater. Technol. Des. 3 (2021) 54–63. https://doi.org/10.54708/26587572_2021_34654.
7. A. Vinogradov, E. Merson, P. Myagkikh, M. Linderov, A. Brilevsky, D. Merson, Attaining High Functional Performance in Biodegradable Mg-Alloys: An Overview of Challenges and Prospects for the Mg–Zn–Ca System, Materials (Basel). 16 (2023) 1324. <https://doi.org/10.3390/ma16031324>.
8. N. Sezer, Z. Evis, S.M. Kayhan, A. Tahmasebifar, M. Koç, Review of magnesium-based biomaterials and their applications, J. Magnes. Alloy. 6 (2018) 23–43. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2018.02.003>.

9. B. Millán-Ramos, D. Morquecho-Marín, P. Silva-Bermudez, D. Ramírez-Ortega, O. Depablos-Rivera, J. García-López, M. Fernández-Lizárraga, A. Almaguer-Flores, J. Victoria-Hernández, D. Letzig, S.E. Rodil, Degradation Behavior and Mechanical Integrity of a Mg-0.7Zn-0.6Ca (wt.%) Alloy: Effect of Grain Sizes and Crystallographic Texture, *Materials* (Basel). 15 (2022) 3142. <https://doi.org/10.3390/ma15093142>.
10. Y. Lu, A.R. Bradshaw, Y.L. Chiu, I.P. Jones, Effects of secondary phase and grain size on the corrosion of biodegradable Mg-Zn-Ca alloys, *Mater. Sci. Eng. C*. 48 (2015) 480–486. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2014.12.049>.
11. B. Jiang, Q. Xiang, A. Atrens, J. Song, F. Pan, Influence of crystallographic texture and grain size on the corrosion behaviour of as-extruded Mg alloy AZ31 sheets, *Corros. Sci.* 126 (2017) 374–380. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2017.08.004>.
12. E. V. Parfenov, O.B. Kulyasova, V.R. Mukaeva, B. Mingo, R.G. Farrakhov, Y. V. Cherneikina, A. Yerokhin, Y.F. Zheng, R.Z. Valiev, Influence of ultra-fine grain structure on corrosion behaviour of biodegradable Mg-1Ca alloy, *Corros. Sci.* 163 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.108303>.
13. J. Fu, W. Du, K. Liu, X. Du, C. Zhao, H. Liang, A. Mansoor, S. Li, Z. Wang, Effect of the Ca₂Mg₆Zn₃ Phase on the Corrosion Behavior of Biodegradable Mg-4.0Zn-0.2Mn-xCa Alloys in Hank's Solution, *Materials* (Basel). 15 (2022) 2079. <https://doi.org/10.3390/ma15062079>.
14. G.L. Song, *Corrosion electrochemistry of magnesium (Mg) and its alloys*, Woodhead Publishing Limited, 2011. <https://doi.org/10.1533/9780857091413.1.3>.
15. K.S. Shin, M.Z. Bian, N.D. Nam, Effects of Crystallographic Orientation on Corrosion Behavior of Magnesium Single Crystals, *JOM*. 64 (2012) 664–670. <https://doi.org/10.1007/s11837-012-0334-0>.
16. D.L. Merson, S.Y. Betsofen, E.D. Merson, V.A. Poluyanov, P.N. Myagkikh, A. V. Danyuk, V.A. Danilov, E.I. Maksimenko, A.I. Brilevskiy, Mechanical and corrosion anisotropy of magnesium single crystal, *Front. Mater. Technol.* (2025) 39–52. <https://doi.org/10.18323/2782-4039-2025-2-72-4>.
17. E.D. Merson, V.A. Poluyanov, P.N. Myagkikh, D.L. Merson, Application of the Acoustic Emission Technique for Studying Kinetics of Corrosion Processes in the ZK60 Magnesium Alloy, *Russ. J. Non-Ferrous Met.* 65 (2024) 142–150. <https://doi.org/10.1134/S1067821224600923>.
18. E.D. Merson, V.A. Poluyanov, P.N. Myagkikh, A.A. Sergeev, D.L. Merson, Relationship between Anisotropy of Corrosion Properties of Extruded Alloys AZ31 and ZK60 with Crystallographic Texture and Volume Distribution of Second Phase Particles, *Russ. J. Non-Ferrous Met.* 65 (2024) 1–10. <https://doi.org/10.1134/S1067821224600832>.
19. E.D. Merson, V.A. Poluyanov, P.N. Myagkikh, A.S. Bunev, D.L. Merson, A. Vinogradov, Improving Corrosion and Stress Corrosion Cracking Performance of Machined Biodegradable Alloy ZX20 by HF-Treatment, *Metals* (Basel). 13 (2023) 1660. <https://doi.org/10.3390/met13101660>.
20. P.N. Myagkikh, E.D. Merson, V.A. Poluyanov, D.L. Merson, The dependence of the biodegradable ZX10 alloy corrosion process on the structural factors and local pH level, *Front. Mater. Technol.* (2023) 59–76. <https://doi.org/10.18323/2782-4039-2023-2-64-3>.