

## **ВЫСОКОПРОЧНЫЕ МЕЛКОЗЕРНИСТЫЕ БИОРАЗЛАГАЕМЫЕ СПЛАВЫ СИСТЕМЫ Mg-Zn-Ca, ОБРАБОТАННЫЕ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИЕЙ**

**Линдеров М.Л.<sup>1</sup>, Брилевский А.И.<sup>1</sup>, Васильев Е.В.<sup>1</sup>, Копылов В.И.<sup>2</sup>,  
Мерсон Д.Л.<sup>1</sup>, Виноградов А.Ю.<sup>1,3</sup>**

<sup>1)</sup> *Институт прогрессивных технологий, Тольяттинский государственный университет, 445020 Тольятти, Россия*

<sup>2)</sup> *Нижегородский государственный университет имени Н. И. Лобачевского, 603950 Нижний Новгород, Россия*

<sup>3)</sup> *Department of Mechanical and Industrial Engineering, Norwegian University of Science and Technology–NTNU, Trondheim N-7491, Norway; alexei.vinogradov@ntnu.no*

В последние годы возрос интерес к магниевым сплавам, как к перспективным материалам для биомедицинских применений, так как они сочетают в себе удачных комплекс важных свойств, среди которых особенно нужно выделить высокую удельную прочность, а также очень хорошую биосовместимость и биоразлагаемость. Среди наиболее перспективных для биомедицинского применения считаются бинарные системы Mg-Zn, Mg-Ca и тройные системы Mg-Zn-Ca, Mg-Zn-Zr и Mg-Zn-Y. Одной из ключевых проблем, связанных с Mg-сплавами, является их недостаточная долговечность и слишком высокие скорости коррозии. Данную проблему предполагается решать путем повышения чистоты исходных компонент сплавов в сочетании с получением необходимого зернограницного дизайна их микроструктуры передовыми методами интенсивной пластической деформации (ИПД).

Целью представленной работы является установление влияния режимов ИПД на усталостные свойства сплавов системы Mg-Zn-Ca, перспективной для изготовления временных имплантатов.

### **Материалы и методы исследования**

Слитки сплава ZX40 системы Mg-Zn-Ca с номинальным химическим составом: Mg-4Zn-0,15Ca и Mg-4Zn-0,56Ca гомогенизировали при 350°C в течение 24 часов, а затем подвергались двум проходам равноканального углового прессования (РКУП) через 90° (2Вс) прямоугольную головку при 325 °C (для сплава с 0,56Ca) и 350 °C (для сплава с 0,15Ca). Часть из полученных образцов (содержащих 0,15Ca) после механической обработки подвергалась ротационной ковке (РК) с коэффициентом экструзии 1,55 при комнатной температуре.

Образцы для механического испытания вырезали с использованием искровой эрозии из центральной части заготовок в форме буквы I с размерами 10×4×3 мм<sup>2</sup>. Испытание на растяжение проводилось на машине Kammrath&Weiss при постоянной скорости перемещения траверсы, соответствующей номинальной скорости деформации 1×10<sup>-4</sup>с<sup>-1</sup>. Испытания на усталость проводились на электромеханической испытательной машине Instron Electropuls E1000 при симметричном цикле нагружения (R=-1), при постоянной амплитуде напряжений  $\Delta\sigma/2$ , с частотой 100Гц.

Микроструктурные исследования проводились с использованием сканирующего электронного микроскопа с полевой эмиссионной пушкой Zeiss SIGMA. Более подробно об условиях проведения испытания можно посмотреть в работе [1].

### **Результаты и их обсуждение**

На рисунке 1 показаны диаграммы растяжения для образцов магниевых сплавов, обработанных РКУП и РКУП+РК. После указанных обработок, наблюдается компромисс между прочностью на разрыв и относительным удлинением, что обычно сообщается для подавляющего большинства металлов и сплавов после проведения ИПД [2]. Ротационная ковка привела к уменьшению среднего размера зерна (*рисунок*

2), что способствовало увеличению прочности на разрыв до очень высокого значения 380 МПа. Для данного сплава, обладающего изначально низкой прочностью, это является очень хорошим показателем. Одновременно происходит снижение относительного удлинения, хотя и не до чрезмерно низкого уровня.

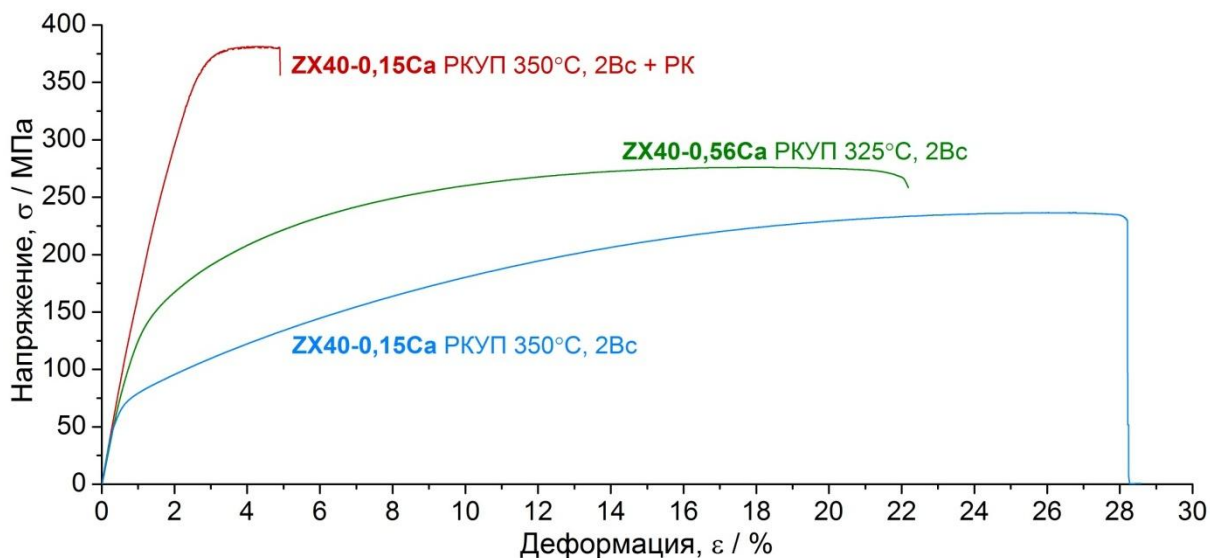


Рисунок 1 - Кривые напряжение-деформация сплавов ZH40, обработанных методами РКУП и РКУП + РК

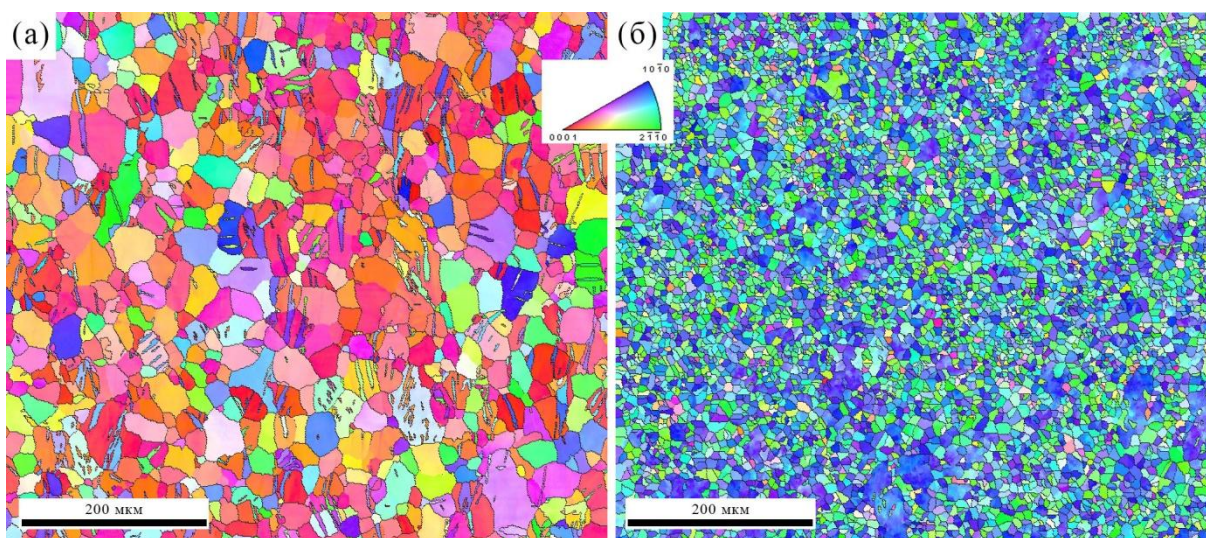


Рисунок 2 - Карты EBSD в цветах обратной полюсной фигуры для сечения сплава ZH40, перпендикулярно направлению экструзии; после (а) РКУП и (б) РКУП+РК процессов. Цветовой код показан на вставке в виде стандартного стереографического треугольника для обеих карт

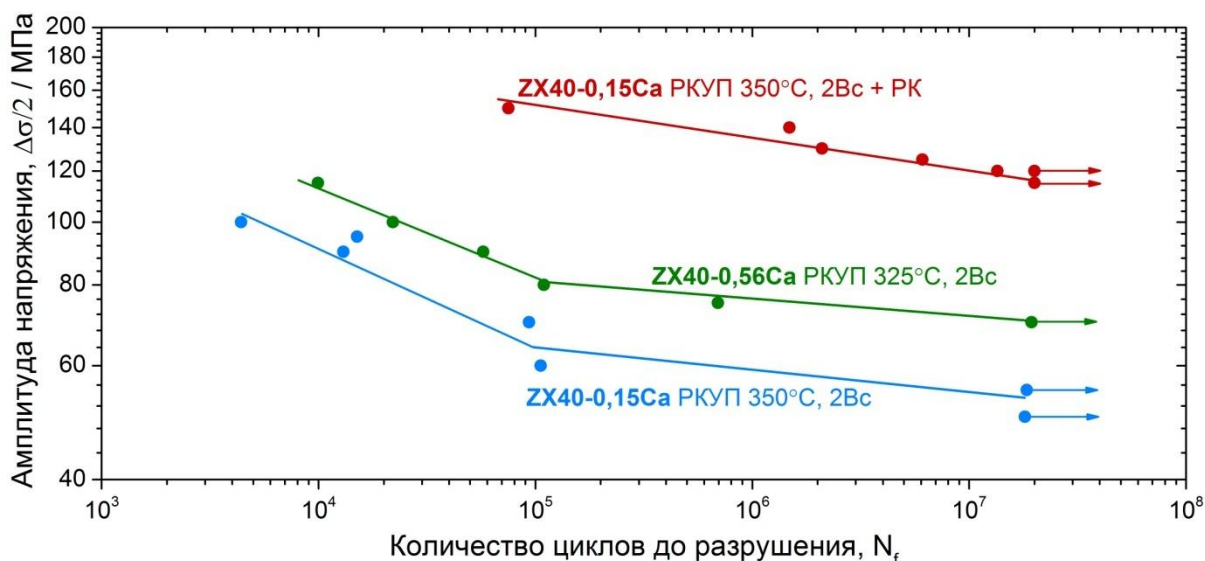


Рисунок 3 - Диаграммы Веллера для обработанных РКУП и РКУП + РК сплавов ZX40 и испытанных на сухом воздухе

Усталостные кривые для сплавов ZX40 после различных обработок показаны на рисунке 3. В то время как материал после РКУП демонстрирует только умеренные усталостные свойства, характерные для многих деформируемых сплавов на основе Mg [3], усталостная выносливость образцов после ротационнойковки заметно улучшается вплоть до 125 МПа при  $10^7$  циклах, что более чем вдвое превышает его РКУП аналог с  $\sigma_{-1} = 55$  МПа. Если сравнивать полученные усталостные значения со сплавом WE43, который уже используется в биомедицинских приложениях для изготовления стентов и обладает пределом выносливости по данным [4] на уровне  $\sigma_{-1} = 110$  МПа (при этом данный сплав относительно сильно легирован редкоземельными элементами), то можно предположить, что полученная комбинация прочности на растяжение и усталостных характеристик в сплаве ZX40 является перспективной для широкого спектра применений этих легких биосовместимых и биоразлагаемых материалов.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки РФ в рамках гранта RFMEFI58317X0070 и госзадания 3.3881.2017/4.6

#### Литература

1. 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. – №9. – 186.
2. Vinogradov, A. Mechanical properties of ultrafine-grained metals: New challenges and perspectives // Advanced Engineering Materials. 2015. – 17. – P. 1710–1722.
3. Ogarevic, V.V., Stephens, R.I. Fatigue of magnesium alloys // Annual Review of Materials Research. 1990. – 20. – P. 141–177.
4. Gu, X.N., Zhou, W.R., Zheng, Y.F., Cheng, Y., Wei, S.C., Zhong, S.P., Xi, T.F., Chen, L.J. Corrosion fatigue behaviors of two biomedical mg alloys—AZ91d and WE43-In simulated body fluid // Acta Biomaterialia. 2010. – 6. – P. 4605–4613.