УДК 691.75
doi: https://doi.org/10.18323/2782-4039-2026-1-75-1

Влияние высокотемпературного РКУП на структуру и механические свойства биодеградируемого сплава Zn-Cu-Mn для медицинских имплантов

Абдрахманова Эльмира Дамировна*[1,5], студент кафедры материаловедения и физики металлов
Хафизова Эльвира Динифовна[1,2,6], кандидат технических наук,
доцент кафедры материаловедения и физики металлов
Поленок Милена Владиславовна[1,7], аспирант, ассистент кафедры материаловедения и физики металлов
Исламгалиев Ринат Кадыханович[1,8], доктор физико-математических наук,
профессор кафедры материаловедения и физики металлов
Ли Чжэнь[3,9], PhD, доцент кафедры материаловедения и химической инженерии
Ли Ли[3,10], PhD, профессор кафедры материаловедения и химической инженерии
Лян Инжу[3,11], аспирант кафедры материаловедения и химической инженерии
Чжан Мэн[3,12], аспирант кафедры материаловедения и химической инженерии
Хакан Йылмазер[4,13], PhD, доцент кафедры металлургии и материаловедения
[1]*Уфимский университет науки и технологий, Уфа (Россия)*
[2]*Институт металлургии и материаловедения имени А.А. Байкова Российской академии наук, Москва (Россия)*
[3]*Харбинский инженерный университет, Харбин (КНР)*
[4]*Технический университет Йылдыз, Стамбул (Турция)*

***E-mail:** KhafizovaED@uust.ru

[5]ORCID: https://orcid.org/0009-0009-2775-7488
[6]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4618-412X
[7]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9774-1689
[8]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6234-7363
[9]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1188-4783
[10]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0157-8106
[11]ORCID: https://orcid.org/0009-0002-2063-2155
[12]ORCID: https://orcid.org/0009-0000-7540-8643
[13]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5602-4966

Поступила в редакцию 02.07.2025 *Пересмотрена 23.01.2026* *Принята к публикации 18.02.2026*

Аннотация: **Проблема.** Применяемые в настоящее время для изготовления мочеточниковых стентов материалы не способны устранить воспаление, обладают низкой прочностью и требуют повторной операции по удалению. Металлические биорезорбируемые стенты способны снизить нагрузку на организм пациента и исключить дополнительные операции по извлечению изделия. **Цель.** Цель – получить новый биосовместимый сплав Zn-1 %Cu-1 %Mn и методом равноканального углового прессования при повышенной температуре сформировать его улучшенный комплекс механических свойств для потенциального применения в качестве материала мочеточниковых стентов. **Методы.** Сплав Zn-1 %Cu-1 %Mn подвергали равноканальному угловому прессованию при 200 °C (8 проходов, маршрут Bc). Микроструктуру и элементный состав исследовали методами просвечивающей электронной микроскопии с энергодисперсионным анализом. Механические свойства оценивали при одноосном растяжении (скорость деформации 10^{-3} $с^{-1}$, не менее 3 образцов на состояние), микроиндентировании по Виккерсу с построением карт распределения твердости и фрактографическим анализом изломов в растровом электронном микроскопе. **Результаты.** Методом индицирования дифракционных картин установлено, что деформационная обработка способствует выделению частиц фазы $MnZn_{13}$, которые могут оказывать упрочняющий эффект. Фрактографический анализ изломов образцов после растяжения показал изменение характера излома с хрупкого на вязкий с глубокими ямками. Проведение равноканального углового прессования (РКУП) 8 проходов при повышенных температурах позволило повысить предел прочности в 2,3 раза, условный предел текучести в 3 раза, а относительное удлинение в 8 раз. Распределение значений микротвердости с увеличением проходов с 2 до 8 становится более однородным, уменьшается разрыв между наименьшим и наибольшим значениями. **Выводы.** Установлено, что метод деформации (РКУП, 8 проходов) для нового биосовместимого сплава Zn-1 %Cu-1 %Mn формирует улучшенный комплекс механических свойств, что открывает возможности для его применения в медицинских целях.

Ключевые слова: Zn-Cu-Mn; цинковые сплавы; биодеградируемые металлы; мочеточниковые стенты; РКУП; равноканальное угловое прессование; просвечивающая электронная микроскопия; механические свойства; биосовместимые сплавы; биосовместимость

Благодарности: Статья подготовлена по материалам докладов участников XII Международной школы «Физическое материаловедение» (ШФМ-2025), Тольятти, 15–19 сентября 2025 года.

Для цитирования: Абдрахманова Э.Д., Хафизова Э.Д., Поленок М.В., Исламгалиев Р.К., Ли Чжэнь, Ли Ли, Лян Инжу, Чжан Мэн, Хакан Йылмазер. Влияние высокотемпературного РКУП на структуру и механические свойства биодеградируемого сплава Zn-Cu-Mn для медицинских имплантов // Frontier Materials & Technologies. 2026. № 1. С. 9–18. DOI: https://doi.org/10.18323/2782-4039-2026-1-75-1.

© Абдрахманова Э.Д., Хафизова Э.Д., Поленок М.В., Исламгалиев Р.К., Ли Чжэнь, Ли Ли, Лян Инжу, Чжан Мэн, Хакан Йылмазер, 2026

ВВЕДЕНИЕ

Применение современных мочеточниковых стентов, изготавливаемых из полимеров, сопряжено с рядом проблем, возникающих при эксплуатации, таких как возникновение воспалительной реакции, инфекции, отложения солей [1; 2]. Ведутся активные исследования по разработке биорезорбируемых полимерных стентов BUS, изготовленных из полимеров природного происхождения [3], антирефлюксного мочеточникового стента с гепариновым покрытием (BraidStent®-H) для предотвращения бактериальной колонизации мочевыводящих путей [4], исследования уретерального стента Tria с покрытием PercuShield и уретерального стента Polaris Ultra с покрытием HydroPlus по кратковременному образованию отложений [5].

Однако изделия из полимеров обладают низкой радиальной прочностью, для достижения больших значений прочности требуется увеличить толщину стенок стента, что невозможно при изготовлении мочеточниковых стентов. С другой стороны, металлические стенты, способные растворяться в организме, являются перспективной альтернативой и уже начинают показывать успешные результаты в клинических исследованиях с пациентами [6]. В качестве биорезорбируемых металлов в основном рассматриваются Mg, Zn, Fe и их сплавы. При исследовании коррозионного поведения Mg-1 %Zn в растворе искуственной мочи была обнаружена локализованная коррозия спустя 72 ч, а также выделения газообразного водорода [7; 8]. Исследования Fe и Fe-Mn-C-Cu показали отложения неорганических солей на поверхности стента, которые могут препятствовать мочеоттоку и вызывать инфекцию [9].

С другой стороны, Zn стенты обладают подходящей скоростью коррозии, так как электродный потенциал Zn находится посередине между Fe и Mg. Zn и его сплавы широко изучены для применений в качестве сосудистых стентов, однако исследования для применений в урологии ограничены. Zn-0,5Al показал наилучшее коррозионное поведение, не накапливая продукты коррозии на поверхности стента, что является ключевым фактором для мочеточниковых стентов [10].

Существует также проблема развития осложнений, таких как возникновение инфекций после имплантации. Ожидается, что добавление Cu в Zn сплавы может устранить это, так как Cu обладает антибактериальными свойствами [11].

Оптимизации механических свойств цинковых сплавов можно достигнуть методом легирования и интенсивной пластической деформации. Равноканальное угловое прессование показало себя как перспективный метод повышения прочности наряду с сохранением пластичности для Mg [12] и Zn [13].

Цель работы – получить новый биосовместимый сплав Zn-1 %Cu-1 %Mn и методом равноканального углового прессования при повышенной температуре сформировать его улучшенный комплекс механических свойств для потенциального применения в качестве материала мочеточниковых стентов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исходный материал и его характеристика

Материалом исследования является цинковый сплав Zn-1 %Cu-1 %Mn (вес.%). Сплав изготовлен методом литья с 3-кратным переплавом для однородного распределения элементов, затем слиток сплава был подвергнут гомогенизационной термообработке при 350 °C в течение 16 ч и экструзии с 15 мм до диаметра 12 мм. Далее в тексте это состояние будет называться исходным. Получение исходного материала осуществлялось в Техническом университете Йылдыз, Турция.

Элементный состав сплава Zn-1%Cu-1%Mn был определен методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДС) на растровом электронном микроскопе JSM-6490LV (Jeol, Япония). Анализ пяти спектров, снятых с поверхности образца, показал следующее среднее содержание компонентов (мас. %): Zn – 98,0; Cu – 0,7; Mn – 1,0. Суммарное содержание примесей не превысило 0,3 мас. %. Погрешность измерений составляла ±1 ат. %.

Деформационная обработка методом РКУП

Деформация методом равноканального углового прессования (РКУП) проводилась на установке «РКУП-20» (УГАТУ, Россия) по маршруту B_c с пересечением угла каналов 120° (рис. 1) и скоростью перемещения траверсы пресса 0,24 мм/с. Пересчет скорости деформации осуществлялся по формуле:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{v}{L_0}\left[c^{-1}\right],$$

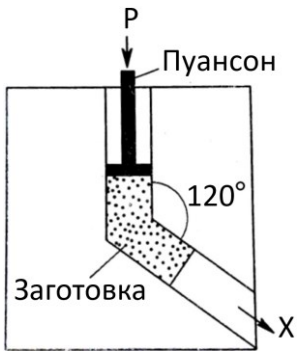


Рис. 1. *Схема деформации РКУП сплава Zn-1%Cu-1%Mn*
Fig. 1. *Schematic diagram of ECAP deformation of the Zn-1%Cu-1%Mn alloy*

где $\dot{\varepsilon}$ – скорость деформации,
v – скорость движения траверсы,
L_0 – длина рабочей части образца.

После проведения расчетов скорость деформации составила 10^{-3} $с^{-1}$.

Сочетание угла 120 °, низкой скорости деформации и повышенной температуры создали благоприятные условия для сохранения целостности заготовки. Для одного из прутков была осуществлена деформация 2 прохода при 150 °С, для второго прутка 4 прохода (2 при 150 °С и 2 при 120 °С), перед проведением прессования образцы отжигались в течение 30 мин при температуре 150 ºС. Диаметр прутков составил 10 мм.

Деформация третьего образца РКУП 8 проходов проводилась по следующей схеме: отжиг 300 °С, 30 мин, деформация осуществлялась с последовательным понижением температуры от 350 до 200 °С с шагом 50 °С по 2 прохода на каждый интервал для более эффективного измельчения зерен.

Подготовка образцов для исследований

Из литых (далее – исходных) и деформированных образцов на электроэрозионном проволочновырезном станке АРТА-120 (НПК «Дельта-Тест», Россия) вырезали диски диаметром 10 мм и толщиной 1,3 мм. Образцы для механических испытаний на растяжение были вырезаны таким образом, чтобы их ось растяжения была ориентирована параллельно направлению X, так как маршрут РКУП B_c позволяет получить почти изотропную структуру прутка [14]. На каждое состояние было подготовлено по 3 образца.

Образцы утоняли до толщины 40 мкм на водоустойчивой шлифовальной бумаге различной зернистости с последовательным переходом от 80 до 5000, затем они были подвергнуты ионному утонению с помощью оборудования МТР-1А (Shanghai Jiada, Китай).

Методы механических испытаний

Статические испытания на одноосное растяжение проводили на малых образцах с длиной рабочей части 4 мм и толщиной 1 мм при комнатной температуре со скоростью 10^{-3} $с^{-1}$ на электромеханической измерительной системе Instron 5982 (Instron, США).

Измерения для карт распределения микротвердости были проведены с шагом 1 мм по всей площади образца. Карты составлялись с использованием программного пакета OriginPro 8.5.

Методы микроструктурного и фрактографического анализа

Исследования микроструктуры и EDS-анализ проводили на просвечивающем электронном микроскопе FEI Talos F200X G2 (THERMOFISHER SCIENTIFIC, США).

Исследования поверхности излома после испытаний на растяжение проводили на растровом электронном микроскопе JEOL JSM-6490LV (Jeol, Япония).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Микроструктура

После двух проходов РКУП при 150 ºС наблюдаются сформированные субзерна (рис. 2 a), зоны с локализованными напряжениями практически отсутствуют. При индицировании дифракционной картины была идентифицирована фаза η-Zn – твердый раствор Zn, в котором присутствовали атомы легирующих элементов (рис. 2 b).

Микрофотографии показывают, что образцы имеют равноосную зеренную структуру: видны субзерна, сформированные в результате накопления дислокаций. Рефлексы (рис. 3 a) соответствуют фазе $MnZn_{13}$ – это также было подтверждено результатами элементного анализа (рис. 3 b). После 4 проходов РКУП присутствует большое количество волнообразных темных полос, особенно затемнена зона вокруг частицы, в отличие от 2 проходов образовалось значительное количество областей с неоднородностями распределения напряжений, особенно на границах зерен и фаз (отмечены белыми стрелками на рис. 3 a).

Механические свойства

Согласно данным статических испытаний на растяжение (таблица 1) предел прочности повысился с 107 МПа (для литого образца) до 244 МПа (после РКУП 8 проходов) с одновременным повышением микротвердости. Значения относительного удлинения существенно возрастают во всех РКУП образцах по сравнению с исходным литым образцом.

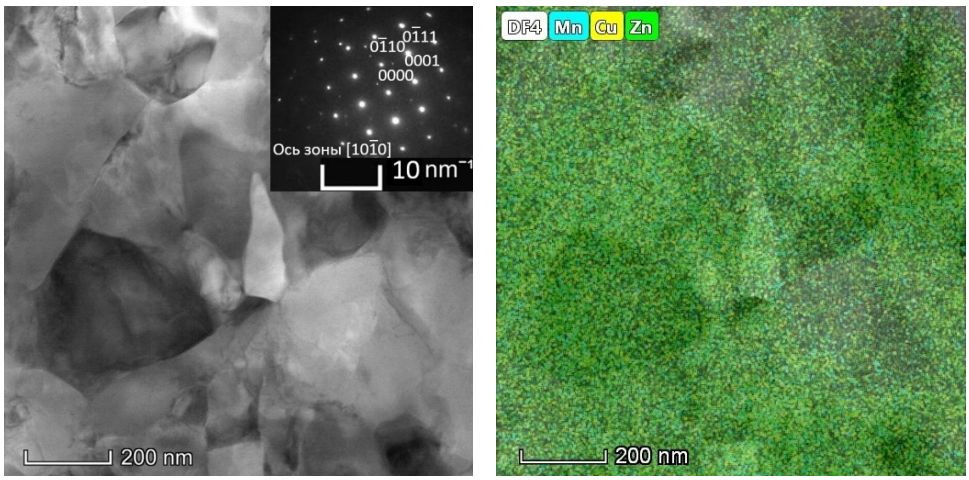
Исходный образец демонстрирует хрупкое разрушение, излом характеризуется острыми сколами и наличием фасеток-ступенек (рис. 4 a). После деформации РКУП 2 прохода происходит квазихрупкое разрушение, на поверхности излома присутствуют высокие острые грани, похожие на гребни (рис. 4 b).

Микрорельеф излома позволяет установить признаки вязкого разрушения, такие как наличие большого количества ямок. Выполненный количественный анализ фрактограмм показал, что средний диаметр ямок в образце после РКУП 4 прохода составляет 609 мкм, а в образце после 8 проходов РКУП – 432 мкм (рис. 5). Образец РКУП 8 проходов демонстрирует типичное вязкое разрушение, о чем свидетельствуют глубокие ямки, а также следы от слияния микропор при разрушении. Ямки сдвига, вытянутые в одном направлении по бокам, свидетельствуют о действии касательных напряжений, глубокие ямки говорят о пластичности материала, в то время как мелкие ямки свидетельствуют о сильной склонности к деформационному упрочнению.

После 2 проходов РКУП наблюдаются наиболее высокие значения твердости 81 HV среди остальных образцов (таблица 1). Для образца 4 прохода РКУП значения микротвердости составили 67 HV, для образца 8 проходов РКУП – 69 HV. С увеличением количества проходов разброс между максимальным и минимальным значением твердости снижается, что свидетельствует о достижении некоторой однородности структуры (рис. 6).

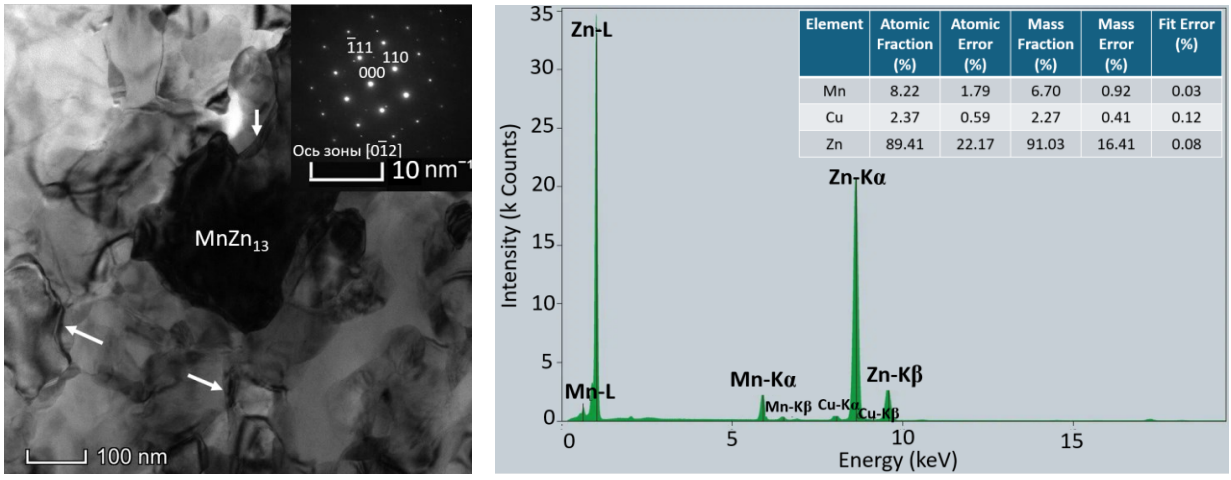
ОБСУЖДЕНИЕ

Неоднородность микротвердости при малом количестве проходов РКУП, по-видимому, связана с неоднородностью деформации на начальных стадиях. Проведение деформации при последовательном понижении температуры с 350 до 200 °С с шагом 50 °С является для цинка высокотемпературной деформацией.



a *b*

Рис. 2. *Микроструктура сплава Zn-1%Cu-1%Mn после 2 проходов РКУП:*
a *– режим светлого поля и дифракционная картина;* ***b*** *– EDS-анализ*
Fig. 2. *Microstructure of the Zn-1%Cu-1%Mn alloy after 2 ECAP passes:*
a *– bright-field mode and diffraction pattern;* ***b*** *– EDS analysis*



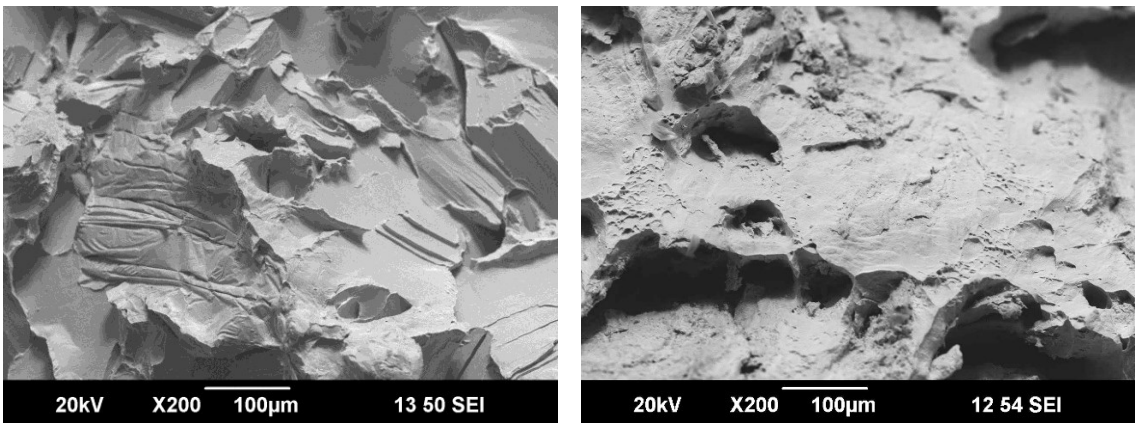
a *b*

Рис. 3. *Микроструктура сплава Zn-1%Cu-1%Mn после 4 проходов РКУП:*
a *– режим светлого поля и дифракционная картина;* ***b*** *– результаты EDS-анализа*
Fig. 3. *Microstructure of the Zn-1%Cu-1%Mn alloy after 4 ECAP passes:*
a *– bright-field mode and diffraction pattern;* ***b*** *– EDS analysis*

Таблица 1. *Механические свойства сплава Zn-1%Cu-1%Mn в литом состоянии и после РКУП*
Table 1. *Mechanical properties of the Zn-1%Cu-1%Mn alloy in the as-cast state and after ECAP*

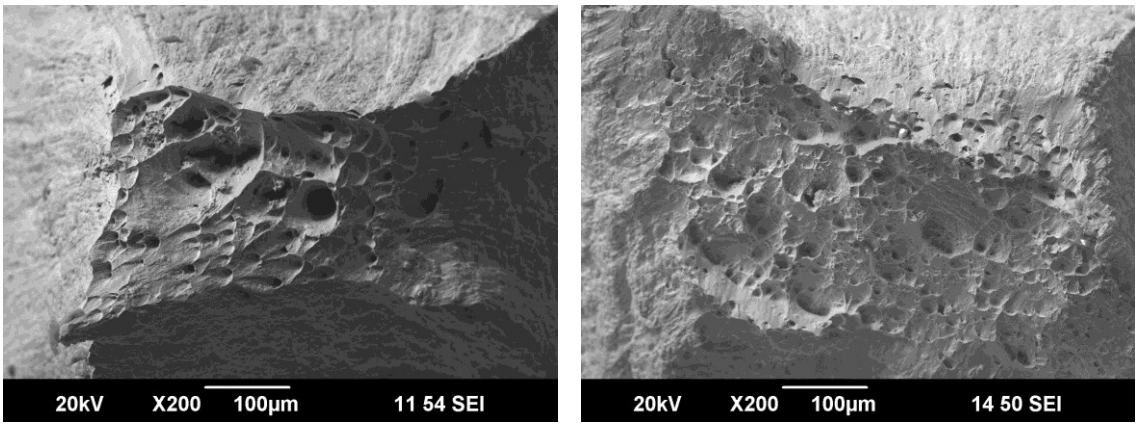
Состояние	HV	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	ε, %	ψ, %
Литой	80±8	107±9	55±6	3±1	3±1
РКУП 2 прохода	81±8	230±12	195±20	13±3	16±5
РКУП 4 прохода	67±7	221±11	108±11	30±3	57±5
РКУП 8 проходов	69±4	244±12	178±18	25±3	77±5

Примечание. HV – микротвердость, $\sigma_в$ – предел прочности, $\sigma_{0,2}$ – условный предел текучести, ε – относительное удлинение, ψ – относительное сужение.
Note. HV is microhardnes, $\sigma_в$ is ultimate tensile strength, $\sigma_{0,2}$ is yield strength, ε is percentage elongation, ψ is reduction of area.



a ***b***

Рис. 4. *Фрактограммы цинкового сплава Zn-1%Cu-1%Mn:* ***a*** *– исходное состояние;* ***b*** *– после 2 проходов РКУП*
Fig. 4. *Fractographs of the Zn-1%Cu-1%Mn zinc alloy:* ***a*** *– initial state;* ***b*** *– after 2 ECAP passes*



a ***b***

Рис. 5. *Фрактограммы цинкового сплава Zn-1%Cu-1%Mn:* ***a*** *– после 4 проходов РКУП;* ***b*** *– после 8 проходов РКУП*
Fig. 5. *Fractographs of the Zn-1%Cu-1%Mn zinc alloy:* ***a*** *– after 4 ECAP passes;* ***b*** *– after 8 ECAP passes*

В ряде зарубежных исследований [15] утверждается, что деформация вызывает выпадение субмикронных и наноразмерных частиц $CuZn_4$ в сплаве Zn-1Cu после 8 проходов РКУП, однако их объемная доля настолько мала, что им удалось идентифицировать частицы только методом ПЭМ, рентгенограммы не показали выраженных пиков $CuZn_4$. Аналогично в нашем предыдущем исследовании Cu-содержащие фазы в РКУП образцах сплава Zn-1Cu-Mn не были идентифицированы, но было установлено выделение фазы $MnZn_{13}$ в процессе РКУП [16]. В настоящем исследовании скопление областей с неоднородностями– размытых темных областей – по границам фазы $MnZn_{13}$ (рис. 3 а) может быть объяснено не только повышенными локализованными напряжениями в местах границ между фазами, но и упрочняющим эффектом – частицы являются препятствием для дислокаций при деформации. Таким образом, увеличение объемной доли $MnZn_{13}$ способствует возникновению локализованных напряжений и повышению прочности материала. Данные структурные элементы являются не только источниками напряжений из-за границ раздела фаз, но и могут способствовать накоплению дислокаций, оказывая дополнительный упрочняющий эффект [17].

Одновременное увеличение предела прочности и снижение значений микротвердости в образцах РКУП 8 проходов, по сравнению с образцами РКУП 2 прохода (таблица 1) могут быть объяснены тем, что для хрупких материалов часто линейное соотношение твердости и прочности не выполняется. В образцах каждого состояния, кроме РКУП 8 проходов, наблюдается повышение относительного удлинения одновременно с повышением значений относительного сужения. Относительное сужение стремительно возрастает из-за развития локализованной деформации. Упрочнение материала при горячей деформации вызывает снижение пластичности, что продемонстрировано в работе [15], где РКУП при повышенной температуре способствовало значительному снижению пластичности и повышению прочности, по сравнению с РКУП при

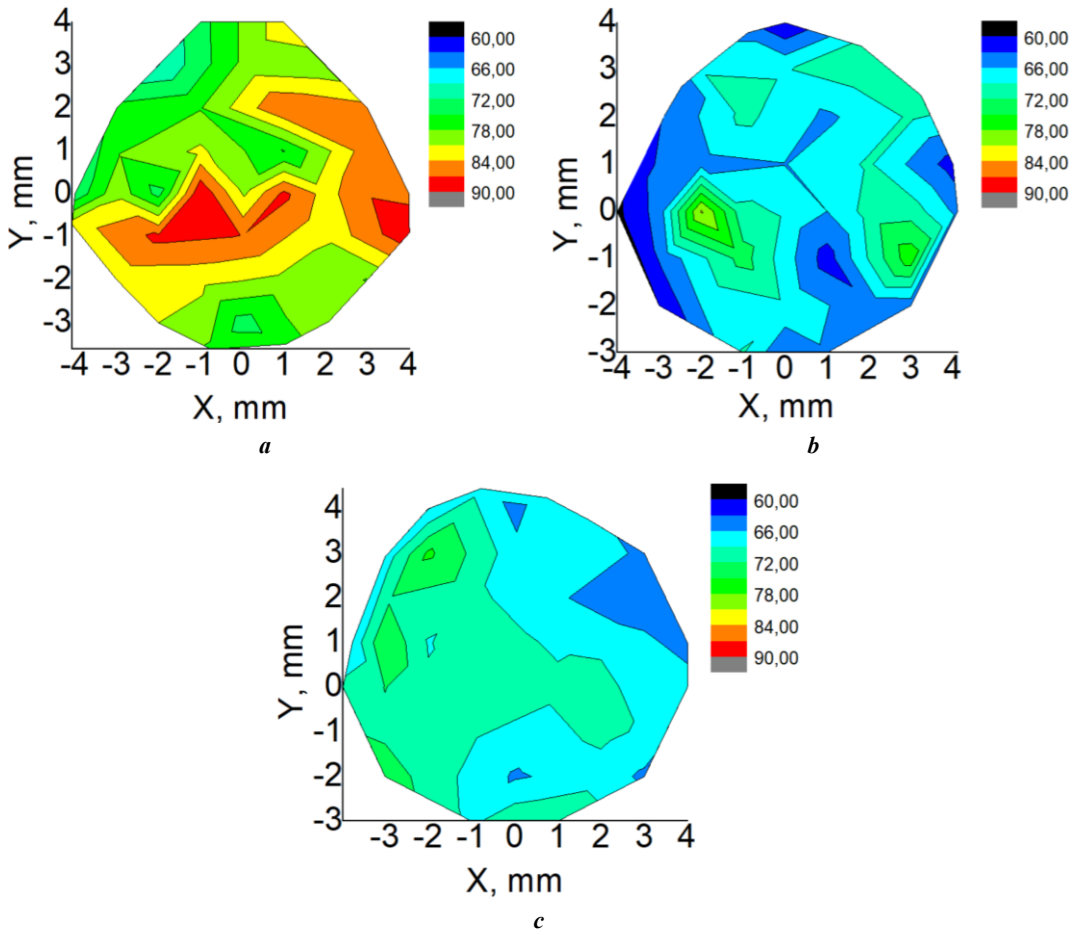


Рис. 6. *Карты распределения микротвердости цинковго сплава Zn-1%Cu-1%Mn:* ***a*** *– 2 прохода;* ***b*** *– 4 прохода;* ***c*** *– 8 проходов*
Fig. 6. *Microhardness distribution maps of the Zn-1%Cu-1%Mn zinc alloy:* ***a*** *– 2 passes;* ***b*** *– 4 passes;* ***c*** *– 8 passes*

комнатной температуре. В условиях деформации при высоких температурах происходят процессы динамической рекристаллизации, где наиболее благоприятными центрами зарождения рекристаллизованных зерен могут являться осажденные частицы и границы зерен. Данные процессы являются причиной упрочнения материала.

Обычно на дне крупных и глубоких ямок располагаются включения, способствовавшие разрушению. В случае сплава Zn-1Mn-1Cu это может быть фаза богатая марганцем, а именно $MnZn_{13}$, идентифицированная при исследовании микроструктуры. Уменьшение среднего размера ямок при переходе от 4 к 8 проходам РКУП означает небольшое снижение пластичности материала, что соотносится с данными таблицы 1.

В результате высокотемпературной обработки методом РКУП было достигнуто повышение пластичности в 4,3; 10 и 8,3 раза для 2, 4 и 8 проходов, соответственно. Такое аномальное повышение пластичности в сочетании с повышением предела прочности в 2,5 раза указывает на проявление признаков сверхпластических механизмов деформации. Это согласуется с результатами исследований [18], в ходе которых были проведены статические испытания на растяжение сплава Zn-0,5Cu при разных скоростях. Установлено, что при скорости деформации 10^{-4} $с^{-1}$ вклад зернограничного проскальзывания достигал 70 %. Горячая деформация в сочетании с низкими скоростями растяжения могла способствовать активации зернограничного проскальзывания.

Также известно, что добавление Cu в цинк способствует резкому повышению пластичности: в работах [18; 19] для сплавов Zn-1 %Cu и Zn-0,5 %Cu зафиксированы значения относительного удлинения 460 % и 510 % соответственно. Данный эффект связывают с активацией зернограничного проскальзывания, что согласуется с результатами статических испытаний [16], где его вклад при скорости деформации 10^{-4} $с^{-1}$ достигал 70 %. Однако в нашем сплаве ключевую роль, по-видимому, играет не только медь, но и присутствие частиц фазы $MnZn_{13}$. Согласно ряду исследований [20], в сплаве Zn-0,5Mn после экструзии осаждение $MnZn_{13}$ способствовало уменьшению размера зерен и индуцировало сверхпластическое поведение при комнатной температуре (относительное удлинение 236 % против 59 % для чистого цинка [21]) Кроме того, в исследовании [22] показано, что в системах Zn-xAl после РКУП зернограничное проскальзывание способно развиваться на фазовых границах даже при относительно крупном зерне. Важно подчеркнуть, что фаза $MnZn_{13}$ может не только стабилизировать мелкозернистую структуру,

но и непосредственно участвовать в релаксации напряжений: частицы способны деформироваться, снижая напряжения и облегчая проскальзывание по границам зерен.

Таким образом, достигнутый уровень пластичности в сплаве Zn-1 %Mn-1 %Cu является следствием механизма зернограничного проскальзывания.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Установлено, что применение интенсивной пластической деформации методом РКУП при повышенной температуре позволяет устранить хрупкость, характерную для исходного состояния разработанного сплава Zn-1 %Cu-1 %Mn. Определено, что обработка по режиму 8 проходов является оптимальной, обеспечивая достижение наиболее высоких прочностных характеристик (предел прочности 244 МПа, предел текучести 177 МПа) в сочетании с высокой пластичностью (относительное удлинение 25 %), что соответствует требованиям к материалам для стентов.

2. Доказано, что осаждение частиц упрочняющей фазы $MnZn_{13}$ в процессе РКУП позволяет не только повысить прочность материала, но и сохранить пластичность благодаря активации механизма зернограничного проскальзывания, что является критически важным фактором для обеспечения надежности биодеградируемых имплантатов в условиях эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Soria F., de la Cruz J.E., Cepeda M., Serrano Á., Sánchez-Margallo F.M. Biodegradable Urinary Stents // Urinary Stents. Current State and Future Perspectives. New York: Springer, 2022. P. 359–373. DOI: 10.1007/978-3-031-04484-7_29.
2. Ghani K.R., Rojanasarot S., Cutone B., Bhattacharyya S.K., Krambeck A.E. Economic burden of complicated ureteral stent removal in patients with kidney stone disease in the USA // Journal of Comparative Effectiveness Research. 2022. Vol. 11. № 17. P. 1253–1261. DOI: 10.2217/cer-2022-0153.
3. Barros A.A., Oliveira C., Ribeiro A.J., Autorino R., Reis R.L., Duarte A.R.C., Lima E. In vivo assessment of a novel biodegradable ureteral stent // World Journal of Urology. 2018. Vol. 36. P. 277–283. DOI: 10.1007/s00345-017-2124-3.
4. Soria F., de La Cruz J.E., Caballero-Romeu J.P., Pamplona M., Rerez-Fentes D., Resel-Folskerma L., Sanchez-Margallo F.M. Comparative assessment of biodegradable-antireflux heparine coated ureteral stent: animal model study // BMC Urology. 2021. Vol. 21. Article number 32. DOI: 10.1186/s12894-021-00802-x.
5. Yoshida T., Takemoto K., Sakata Y., Matsuzaki T., Koito Y., Yamashita S., Hara I., Kinoshita H., Matsuda T. A randomized clinical trial evaluating the short-term results of ureteral stent encrustation in urolithiasis patients undergoing ureteroscopy: micro-computed tomography evaluation // Scientific Reports. 2021. Vol. 11. Article number 10337. DOI: 10.1038/s41598-021-89808-x.
6. Khoo C.C., Abboudi H., Cartwright R., El-Husseiny T., Dasgupta R. Metallic Ureteric Stents in Malignant Ureteric Obstruction: A Systematic Review // Urology. 2018. Vol. 118. P. 12–20. DOI: 10.1016/j.urology.2018.01.019.
7. Di Tie, Hort N., Minfang Chen, Renguo Guan, Ulasevich S., Skorb E.V., Dapeng Zhao, Yili Liu, Holt-Torres P., Huinan Liu. In vivo urinary compatibility of Mg-Sr-Ag alloy in swine model // Bioactive Materials. 2021. Vol. 7. P. 254–262. DOI: 10.1016/j.bioactmat.2021.05.046.
8. Di Mei, Cheng Wang, Nienaber M., Pacheco M., Barros A., Neves S., Reis R.L., Shijie Zhu, Bohlen J., Letzig D., Shaokang Guan, Zheludkevich M.L., Lamaka S.V. Corrosion behavior of Mg wires for ureteral stent in artificial urine solution // Corrosion Science. 2021. Vol. 189. Article number 109567. DOI: 10.1016/j.corsci.2021.109567.
9. Zheng Ma, Ming Gao, Di Na, Yangde Li, Lili Tan, Ke Yang. Study on a biodegradable antibacterial Fe-Mn-C-Cu alloy as urinary implant material // Materials Science and Engineering: C. 2019. Vol. 103. Article number 109718. DOI: 10.1016/j.msec.2019.05.003.
10. Champagne S., Mostaed E., Safizadeh F., Ghali E., Vedani M., Hermawan H. In Vitro Degradation of Absorbable Zinc Alloys in Artificial Urine // Materials (Basel). 2019. Vol. 12. № 2. Article number 295. DOI: 10.3390/ma12020295.
11. Chatterjee A.K., Chakraborty R., Basu T. Mechanism of antibacterial activity of copper nanoparticles // Nanotechnology. 2014. Vol. 25. № 13. Article number 135101. DOI: 10.1088/0957-4484/25/13/135101.
12. Martynenko N., Lukyanova E., Anisimova N., Kiselevskiy M., Serebryany V., Yurchenko N., Raab G., Birbilis N., Salishchev G., Dobatkin S., Estrin Y. Improving the property profile of a bioresorbable Mg-Y-Nd-Zr alloy by deformation treatments // Materialia. 2020. Vol. 13. Article number 100841. DOI: 10.1016/j.mtla.2020.100841.
13. He Huang, Huan Liu, Li-Sha Wang, Yu-Hua Li, Agbedor S.-O., Feng Xue, Jing-Hua Jiang. A High-Strength and Biodegradable Zn–Mg Alloy with Refined Ternary Eutectic Structure Processed by ECAP // Acta Metallurgica Sininica (English Letters). 2020. Vol. 33. P. 1191–1200. DOI: 10.1007/s40195-020-01027-x.
14. Rifai M., Miyamoto H., Fujiwara H. Effect of ECAP Deformation Route on the Degree of Anisotropy of Microstructure of Extremely Low CN Fe-20mass%Cr Alloy // Metals. 2014. Vol. 4. № 1. P. 55–63. DOI: 10.3390/met4010055.
15. Kangxuan Ren, Kaixiao Zhang, Yue Zhang, Jia Ju, Kai Yan, Jinghua Jiang, Aibin Ma, Feng Xue, Jing Bai, Huan Liu. Effect of ECAP temperature on formation of triple heterogeneous microstructure and mechanical properties of Zn–1Cu alloy // Materials Science and Engineering: A. 2021. Vol. 826. Article number 141990. DOI: 10.1016/j.msea.2021.141990.
16. Abdrakhmanova E.D., Nugamanov F.V., Khafizova E.D., Islamgaliev R.K., Polenok M.V., Nafikov R.K., Yilmazer H. Structure and mechanical properties of Zn-1Cu-1Mn and Zn-0.8Al-0.5Ag alloys processed by ECAP // Russian Physics Journal. 2024. Vol. 67. P. 1661–1667. DOI: 10.1007/s11182-024-03297-9.
17. Cuilan Dong, Zikun Liao, Yanyi Yin, Yinzhi Yi, Guanghui Zhu, Tuquan Zheng, Qian Tan, Yonghong Xie. Effects of Nanoscale precipitates on mechanical properties, corrosion resistance, and biocompatibility in Zn-Mn alloy // Scientific Reports. 2025. Vol. 15. Article number 5454. DOI: 10.1038/s41598-025-89748-w.
18. Mostaed E., Ardakani M.S., Sikora-Jasinska M., Drelich J.W. Precipitation induced room temperature superplasticity in

Zn-Cu alloys // Materials Letters. 2019. Vol. 244. P. 203–206. DOI: 10.1016/j.matlet.2019.02.084.
19. Bednarczyk W., Wątroba M., Kawałko J., Bała P. Can zinc alloys be strengthened by grain refinement? A critical evaluation of the processing of low-alloyed binary zinc alloys using ECAP // Materials Science and Engineering: A. 2019. Vol. 748. P. 357–366. DOI: 10.1016/j.msea.2019.01.117.
20. Pushan Guo, Fuxia Li, Lijing Yang, Bagheri R., Qingke Zhang, Bernard Qiong Li, Kailynn Cho, Zhenlun Song, Wensheng Sun, Huinan Liu. Ultra-fine-grained Zn-0.5Mn alloy processed by multi-pass hot extrusion: Grain refinement mechanism and room-temperature superplasticity // Materials Science and Engineering: A. 2019. Vol. 748. P. 262–266. DOI: 10.1016/j.msea.2019.01.089.
21. Fengjian Shi, Xiao Chen, Nanying Piao, Xin Jiang, Wei Liu, Hu Zhou, Leigang Wang, Xiaoxi Wang, Yihao Wang, Ruoxian Zuo. Research on the deformation behavior of pure zinc fabricated by forward extrusion and composite extrusion // Materials Today Communications. 2024. Vol. 40. Article number 109798. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2024.109798.
22. Demirtas M., Purcek G., Yanar H., Zhang Z.J., Zhang Z.F. Effect of Chemical Composition and Grain Size on RT Superplasticity of Zn-Al alloys processed by ECAP // Letters on materials. 2015. Vol. 5. № 3. P. 328–334. DOI: 10.22226/2410-3535-2015-3-328-334.

REFERENCES

1. Soria F., de la Cruz J.E., Cepeda M., Serrano Á., Sánchez-Margallo F.M. Biodegradable Urinary Stents. *Urinary Stents. Current State and Future Perspectives*. New York, Springer Publ., 2022, pp. 359–373. DOI: 10.1007/978-3-031-04484-7_29.
2. Ghani K.R., Rojanasarot S., Cutone B., Bhattacharyya S.K., Krambeck A.E. Economic burden of complicated ureteral stent removal in patients with kidney stone disease in the USA. *Journal of Comparative Effectiveness Research*, 2022, vol. 11, no. 17, pp. 1253–1261. DOI: 10.2217/cer-2022-0153.
3. Barros A.A., Oliveira C., Ribeiro A.J., Autorino R., Reis R.L., Duarte A.R.C., Lima E. In vivo assessment of a novel biodegradable ureteral stent. *World Journal of Urology*, 2018, vol. 36, pp. 277–283. DOI: 10.1007/s00345-017-2124-3.
4. Soria F., de La Cruz J.E., Caballero-Romeu J.P., Pamplona M., Rerez-Fentes D., Resel-Folskerma L., Sanchez-Margallo F.M. Comparative assessment of biodegradable-antireflux heparine coated ureteral stent: animal model study. *BMC Urology*, 2021, vol. 21, article number 32. DOI: 10.1186/s12894-021-00802-x.
5. Yoshida T., Takemoto K., Sakata Y., Matsuzaki T., Koito Y., Yamashita S., Hara I., Kinoshita H., Matsuda T. A randomized clinical trial evaluating the short-term results of ureteral stent encrustation in urolithiasis patients undergoing ureteroscopy: micro-computed tomography evaluation. *Scientific Reports*, 2021, vol. 11, article number 10337. DOI: 10.1038/s41598-021-89808-x.
6. Khoo C.C., Abboudi H., Cartwright R., El-Husseiny T., Dasgupta R. Metallic Ureteric Stents in Malignant Ureteric Obstruction: A Systematic Review. *Urology*, 2018, vol. 118, pp. 12–20. DOI: 10.1016/j.urology.2018.01.019.
7. Di Tie, Hort N., Minfang Chen, Renguo Guan, Ulasevich S., Skorb E.V., Dapeng Zhao, Yili Liu, Holt-Torres P., Huinan Liu. In vivo urinary compatibility of Mg-Sr-Ag alloy in swine model. *Bioactive Materials*, 2021, vol. 7, pp. 254–262. DOI: 10.1016/j.bioactmat.2021.05.046.
8. Di Mei, Cheng Wang, Nienaber M., Pacheco M., Barros A., Neves S., Reis R.L., Shijie Zhu, Bohlen J., Letzig D., Shaokang Guan, Zheludkevich M.L., Lamaka S.V. Corrosion behavior of Mg wires for ureteral stent in artificial urine solution. *Corrosion Science*, 2021, vol. 189, article number 109567. DOI: 10.1016/j.corsci.2021.109567.
9. Zheng Ma, Ming Gao, Di Na, Yangde Li, Lili Tan, Ke Yang. Study on a biodegradable antibacterial Fe-Mn-C-Cu alloy as urinary implant material. *Materials Science and Engineering: C*, 2019, vol. 103, article number 109718. DOI: 10.1016/j.msec.2019.05.003.
10. Champagne S., Mostaed E., Safizadeh F., Ghali E., Vedani M., Hermawan H. In Vitro Degradation of Absorbable Zinc Alloys in Artificial Urine. *Materials (Basel)*, 2019, vol. 12, no. 2, article number 295. DOI: 10.3390/ma12020295.
11. Chatterjee A.K., Chakraborty R., Basu T. Mechanism of antibacterial activity of copper nanoparticles. *Nanotechnology*, 2014, vol. 25, no. 13, article number 135101. DOI: 10.1088/0957-4484/25/13/135101.
12. Martynenko N., Lukyanova E., Anisimova N., Kiselevskiy M., Serebryany V., Yurchenko N., Raab G., Birbilis N., Salishchev G., Dobatkin S., Estrin Y. Improving the property profile of a bioresorbable Mg-Y-Nd-Zr alloy by deformation treatments. *Materialia*, 2020, vol. 13, article number 100841. DOI: 10.1016/j.mtla.2020.100841.
13. He Huang, Huan Liu, Li-Sha Wang, Yu-Hua Li, Agbedor S.-O., Feng Xue, Jing-Hua Jiang. A High-Strength and Biodegradable Zn–Mg Alloy with Refined Ternary Eutectic Structure Processed by ECAP. *Acta Metallurgica Sininica (English Letters)*, 2020, vol. 33, pp. 1191–1200. DOI: 10.1007/s40195-020-01027-x.
14. Rifai M., Miyamoto H., Fujiwara H. Effect of ECAP Deformation Route on the Degree of Anisotropy of Microstructure of Extremely Low CN Fe-20mass%Cr Alloy. *Metals*, 2014, vol. 4, no. 1, pp. 55–63. DOI: 10.3390/met4010055.
15. Kangxuan Ren, Kaixiao Zhang, Yue Zhang, Jia Ju, Kai Yan, Jinghua Jiang, Aibin Ma, Feng Xue, Jing Bai, Huan Liu. Effect of ECAP temperature on formation of triple heterogeneous microstructure and mechanical properties of Zn–1Cu alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 2021, vol. 826, article number 141990. DOI: 10.1016/j.msea.2021.141990.
16. Abdrakhmanova E.D., Nugamanov F.V., Khafizova E.D., Islamgaliev R.K., Polenok M.V., Nafikov R.K., Yilmazer H. Structure and mechanical properties of Zn-1Cu-1Mn and Zn-0.8Al-0.5Ag alloys processed by ECAP. *Russian Physics Journal*, 2024, vol. 67, pp. 1661–1667. DOI: 10.1007/s11182-024-03297-9.
17. Cuilan Dong, Zikun Liao, Yanyi Yin, Yinzhi Yi, Guanghui Zhu, Tuquan Zheng, Qian Tan, Yonghong Xie. Effects of Nanoscale precipitates on mechanical properties, corrosion resistance, and biocompatibility in Zn-Mn alloy. *Scientific Reports*, 2025, vol. 15, article number 5454. DOI: 10.1038/s41598-025-89748-w.

18. Mostaed E., Ardakani M.S., Sikora-Jasinska M., Drelich J.W. Precipitation induced room temperature superplasticity in Zn-Cu alloys. *Materials Letters*, 2019, vol. 244, pp. 203–206. DOI: 10.1016/j.matlet.2019.02.084.
19. Bednarczyk W., Wątroba M., Kawałko J., Bała P. Can zinc alloys be strengthened by grain refinement? A critical evaluation of the processing of low-alloyed binary zinc alloys using ECAP. *Materials Science and Engineering: A*, 2019, vol. 748, pp. 357–366. DOI: 10.1016/j.msea.2019.01.117.
20. Pushan Guo, Fuxia Li, Lijing Yang, Bagheri R., Qingke Zhang, Bernard Qiong Li, Kailynn Cho, Zhenlun Song, Wensheng Sun, Huinan Liu. Ultra-fine-grained Zn-0.5Mn alloy processed by multi-pass hot extrusion: Grain refinement mechanism and room-temperature superplasticity. *Materials Science and Engineering: A*, 2019, vol. 748, pp. 262–266. DOI: 10.1016/j.msea.2019.01.089.
21. Fengjian Shi, Xiao Chen, Nanying Piao, Xin Jiang, Wei Liu, Hu Zhou, Leigang Wang, Xiaoxi Wang, Yihao Wang, Ruoxian Zuo. Research on the deformation behavior of pure zinc fabricated by forward extrusion and composite extrusion. *Materials Today Communications*, 2024, vol. 40, article number 109798. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2024.109798.
22. Demirtas M., Purcek G., Yanar H., Zhang Z.J., Zhang Z.F. Effect of Chemical Composition and Grain Size on RT Superplasticity of Zn-Al alloys processed by ECAP. *Letters on materials*, 2015, vol. 5, no. 3, pp. 328–334. DOI: 10.22226/2410-3535-2015-3-328-334.

UDC 691.75
doi: https://doi.org/10.18323/2782-4039-2026-1-75-1

Influence of high-temperature ECAP on the structure and mechanical properties of a biodegradable Zn-Cu-Mn alloy for medical implants

Elmira D. Abdrakhmanova*[1,5], student of the Department of Materials Science and Metal Physics
Elvira D. Khafizova[1,2,6], PhD (Engineering), assistant professor of Chair of Materials Science and Metal Physics
Milena V. Polenok[1,7], postgraduate student of Chair of Materials Science and Metal Physics
Rinat K. Islamgaliev[1,8], Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), professor of Chair of Materials Science and Metal Physics
Zhen Li[3,9], PhD, assistant professor of Chair of Materials Science and Chemical Engineering
Li Li[3,10], PhD, professor of Chair of Materials Science and Chemical Engineering
Yingzhu Liang[3,11], postgraduate student of Chair of Materials Science and Chemical Engineering
Meng Zhang[3,12], postgraduate student of Chair of Materials Science and Chemical Engineering
Yilmazer Hakan[4,13], PhD (Materials Science), assistant professor of Chair of Metallurgy and Materials Science
[1]*Ufa University of Science and Technology, Ufa (Russia)*
[2]*A.A. Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of the Russian Academy of Sciences, Moscow (Russia)*
[3]*Harbin Engineering University, Harbin city (China)*
[4]*Yildiz Technical University, İstanbul (Turkey)*

***E-mail:** KhafizovaED@uust.ru

[5]ORCID: https://orcid.org/0009-0009-2775-7488
[6]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4618-412X
[7]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9774-1689
[8]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6234-7363
[9]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1188-4783
[10]ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0157-8106
[11]ORCID: https://orcid.org/0009-0002-2063-2155
[12]ORCID: https://orcid.org/0009-0000-7540-8643
[13]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5602-4966

Received 02.07.2025 *Revised 23.01.2026* *Accepted 18.02.2026*

Abstract: **Problem.** Currently used materials for ureteral stents are unable to eliminate inflammation, exhibit low strength, and require a second surgery for removal. Metallic bioresorbable stents can reduce the burden on the patient's body and eliminate additional operations for product removal. **Aim.** To produce a new biocompatible Zn-1 %Cu-1 %Mn alloy and, using equal-channel angular pressing at elevated temperature, to develop an improved set of mechanical properties for potential application as a material for ureteral stents. **Methods.** The Zn-1 %Cu-1 %Mn alloy was subjected to equal-channel angular pressing at 200 °C (8 passes, route Bc). The microstructure and elemental composition were studied using transmission electron microscopy with energy-dispersive analysis. Mechanical properties were evaluated under uniaxial tension (strain rate of 10^{-3} c^{-1}, at least 3 samples per each condition), Vickers microindentation with construction of hardness distribution maps, and fractographic analysis of fracture surfaces using a scanning electron microscope. **Results.** By indexing diffraction patterns, it was established that the deformation processing promotes the precipitation of $MnZn_{13}$ phase particles, which may have a strengthening effect. Fractographic analysis of fractured samples after tension showed a change in the fracture character from brittle to ductile with deep dimples. Carrying out equal-channel angular pressing (ECAP) for 8 passes at elevated tem-

peratures allowed increasing the ultimate tensile strength by 2.3 times, the offset yield strength by 3 times, and the percentage elongation by 8 times. The distribution of microhardness values becomes more uniform with an increase in passes from 2 to 8, and the gap between the smallest and largest values decreases. **Conclusions.** It was established that the deformation method (ECAP, 8 passes) for the new biocompatible Zn-1 %Cu-1 %Mn alloy develops an improved set of mechanical properties, which opens up possibilities for its application in medical purposes.

Keywords: Zn-Cu-Mn; zinc alloys; biodegradable metals; ureteral stents; ECAP; equal-channel angular pressing; transmission electron microscopy; mechanical properties; biocompatible alloys; biocompatibility

Acknowledgments: The paper was written on the reports of the participants of the XII International School of Physical Materials Science (SPM-2025), Togliatti, September 15–19, 2025.

For citation: Abdrakhmanova E.D., Khafizova E.D., Polenok M.V., Islamgaliev R.K., Li Zhen, Li Li, Liang Yingzhu, Zhang Meng, Hakan Yilmazer. Influence of high-temperature ECAP on the structure and mechanical properties of a biodegradable Zn-Cu-Mn alloy for medical implants. *Frontier Materials & Technologies*, 2026, no. 1, pp. 9–18. DOI: https://doi.org/10.18323/2782-4039-2026-1-75-1.