

The effect of copper on the microstructure and mechanical properties of Bio Zn-Cu alloy

Mohammad Zamani¹, Fereshteh Hosseinabadi², *Mohammad Reza Abutalebi³, Seyed Hossein Seyedein⁴

1- MSc, School of Metallurgy and Materials Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

2- Postdoctoral researcher, School of Metallurgy and Materials Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

3- Professor, School of Metallurgy and Materials Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

4- Professor, School of Metallurgy and Materials Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

Citation: Zamani M, Hosseinabadi F, Abutalebi M. R, Seyedein S.H. The effect of copper on the microstructure and mechanical properties of Bio Zn-Cu alloy. Metallurgical Engineering 2021; 24(3): 206-215 <http://dx.doi.org/10.22076/ME.2022.545378.1341>

doi: <http://dx.doi.org/10.22076/ME.2022.545378.1341>

ABSTRACT

In this study, the effect of copper on the microstructure and mechanical properties of the Zn-xCu (x= 1,2 and 3.5 Wt.%) bioalloy were investigated. The extrusion was performed on Zn-xCu alloys with speed of 2 mm/min at a temperature of 240 °C to improve microstructure and mechanical properties. The extrusion ratio was considered to be 5 to 1. In order to investigate the effect of copper on the mechanical properties of this alloy such as yield strength, tensile strength and relative elongation percentage, the extruded specimens were subjected to uniaxial tensile test at room temperature. The results of tensile test showed that the highest yield strength, ultimate strength and elongation were obtained by Zn-3.5Cu alloy which is 215MPa, 234 MPa and 46%, respectively, which meets the general design criteria for cardiovascular stents. Scanning Electron Microscope images showed that as the Cu content increases, more CuZn₅ precipitates were formed. Microstructural studies show that with increasing the copper content, the secondary phase distribution in the matrix increases and during the extrusion process, the secondary phases are crushed and stretched in the extrusion direction, which increases the yield stress and tensile strength of the alloy with higher copper content.

Keywords: Zn-Cu alloy, copper content, extrusion, mechanical properties, cardiovascular stent.

Received: 22 December 2021 | Accepted: 26 September 2022

■ ■

* *Corresponding Author:*

Mohammad Reza Abutalebi, PhD

Address: School of Metallurgy and Materials Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

Tel: +98 (21) 77459151

E-mail: mrezab@iust.ac.ir

بررسی تاثیر مس بر ریزساختار و خواص مکانیکی بیوآلیاژ Zn-Cu

محمد زمانی^۱، فرشته حسینی آبادی^۲، *محمد رضا ابوطالبی^۳، سید حسین سیدین^۴

- ۱- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
- ۲- محقق پسادکتری، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
- ۳- استاد، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
- ۴- استاد، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

چکیده

در این تحقیق به بررسی تاثیر مس بر ریزساختار و خواص مکانیکی بیوآلیاژ Zn-Cu پرداخته شده است. عملیات ترمومکانیکی اکستروژن به منظور بهبود ریزساختار و خواص مکانیکی بر آلیاژهای با درصدهای مختلف مس صورت گرفت. فرآیند اکستروژن با سرعت ۲ میلیمتر بر دقیقه و در دمای ۲۴۰ °C و با نسبت اکستروژن ۵ به ۱ انجام شد. به منظور بررسی تاثیر مس بر خواص کششی آلیاژ مذکور نظیر استحکام تسلیم، استحکام کشش و درصد ازدیاد طول نسبی، نمونه‌های اکستروژن شده تحت آزمایش کشش تک‌محور در دمای اتاق قرار گرفتند. نتایج آزمایش کشش نشان داد که بیشترین مقدار استحکام تسلیم ۲۱۵ MPa، استحکام نهایی ۲۳۴ MPa و ازدیاد طول نسبی ۴۶٪ مربوط به آلیاژ Zn-3.5Cu بوده است که معیارهای طراحی کلی برای استنت‌های قلبی عروقی را برآورده می‌کند. تصاویر ریز ساختار حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داد که با افزایش غلظت مس، فاز CuZn_۳ بیشتری رسوب کرده است. مطالعات ریزساختاری حاکی از آن است که با افزایش درصد مس توزیع فاز ثانویه در زمینه بیشتر شده و حین فرآیند اکستروژن فازهای ثانویه خرد شده و در جهت اکستروژن کشیده شده‌اند و همین امر سبب افزایش تنش تسلیم و استحکام کششی در آلیاژ با درصد مس بیشتر می‌شود.

واژه‌های کلیدی: آلیاژ Zn-Cu، غلظت مس، اکستروژن، خواص مکانیکی، استنت قلبی عروقی.

دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۰۱ | پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۰۴

۱. مقدمه

و در شرایط کار شده حدود ۱۲۰ MPa است که این مقدار بسیار کمتر از معیار استاندارد مورد نیاز برای نمونه ایمپلنت و یا استنت عروقی مورد استفاده در بدن موجود زنده می‌باشد (300 MPa < UTS) [۳-۵]. خوشبختانه میزان نرخ خوردگی پایین روی نسبت به منیزیم [۵] باعث می‌شود آزادی عمل بیشتری از نظر متالورژیکی، جهت استفاده طیف گسترده‌ای از عناصر غیرسمی وجود داشته باشد. با افزودن عناصر آلیاژی و نیز بهبود ریزساختار توسط عملیات ترمومکانیکی، خواص مکانیکی آلیاژهای روی در شرایط ریختگی را می‌توان بهبود بخشید. از همین رو، مطالعات گسترده‌ای بر روی آلیاژهای مختلف روی نظیر Zn-Mg، Zn-Al، Zn-Ag، Zn-Fe، Zn-Ca، Zn-Sr و Zn-Cu به منظور کاربردهای صنعتی و زیستی صورت گرفته است [۸-۱۵]. در آلیاژ پایه روی به عنوان یک آلیاژ زیست سازگار، عناصر آلیاژی باید به دقت انتخاب شوند تا

امروزه مطالعات نسبتاً گسترده‌ای در مورد کاربرد روی و آلیاژهای آن به عنوان آلیاژهای زیست‌سازگار جهت تولید ایمپلنت‌های زیست تخریب‌پذیر انجام گرفته است. آلیاژهای روی تجزیه پذیری قابل قبول، رفتار خوردگی بهتر و زیست‌سازگاری مناسبی را نسبت به فلزات زیست‌سازگار پایه منیزیم نشان می‌دهد [۱-۷]. علیرغم زیست‌سازگاری و زیست تجزیه پذیری مناسب فلز روی، محدودیت‌هایی در رابطه با خواص مکانیکی بیوآلیاژهای روی از جمله مقاومت خزش پایین، حساسیت زیاد به پیرسازی طبیعی و تبلور مجدد استاتیک وجود دارد که ممکن است منجر به عدم کارایی وسیله در حین نگهداری در دمای اتاق و استفاده در دمای بدن شود [۱ و ۲]. مهم‌ترین محدودیت استفاده از روی خالص به عنوان ایمپلنت، استحکام مکانیکی ضعیف آن می‌باشد، استحکام کششی نهایی روی خالص حدود ۲۰ MPa

* نویسنده مسئول:

دکتر محمد رضا ابوطالبی

نشانی: تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی.

تلفن: ۰۲۱ ۷۷۴۵۹۱۵۱ (۲۱) ۰۹۸

پست الکترونیکی: mrezab@iust.ac.ir

جدول ۱. میانگین ترکیب شیمیایی آلیازهای مورد استفاده در این پژوهش برحسب درصد وزنی

آلیاز	Zn (%.Wt)	Cu (%.Wt)
Zn-1Cu	۹۸/۸۴	۱/۱۵
Zn-2Cu	۹۸	۲
Zn-3.5Cu	۹۶/۴۷	۳/۵۲

شده برای ساخت و ریخته‌گری آلیاز با ترکیب شیمیایی هدف Zn-Cu (۱، ۲، ۳/۵) مورد استفاده قرار گرفت. ریخته‌گری با استفاده از کوره زمینی و در دمای 600°C و فشار محیط 1 atm انجام شده است. پس از تهیه نمونه‌ها جهت اطمینان از ترکیب شیمیایی آلیازها، آنالیز فلورسانس پرتو ایکس (XRF) انجام شد که نتایج در جدول ۱ ارائه شده است.

به منظور همگن‌سازی نمونه‌های ریخته‌گری شده، با توجه به نقطه ذوب آلیاز و همچنین تحقیقات قبلی انجام شده، نمونه‌ها به مدت ۸ ساعت در دمای 360°C قرار گرفتند. در پایان فرآیند همگن‌سازی، برای جلوگیری از رسوب‌گذاری مجدد، نمونه‌ها در آب به سرعت خنک گردیدند. آلیازهای همگن شده با قطر 5 cm و طول 15 cm جهت عملیات اکستروژن آماده‌سازی شدند. عملیات ترمومکانیکی اکستروژن توسط دستگاه اکستروژن با سرعت 2 mm/min و در دمای 240°C با کاهش سطح مقطع از 5 cm به 1 cm انجام شد. جهت کاهش اصطکاک نمونه با سطوح داخلی قالب از گرافیت به عنوان روان‌کار استفاده شد. سپس نمونه‌های خارج شده از دستگاه در هوا تا دمای اتاق سرد شدند. پس از تهیه آلیازها، این نمونه‌ها مانت شده و بعد از انجام عملیات رایج لازم نظیر سایش و پولیش، حک‌کاری شیمیایی با استفاده از محلول 20 gr CrO_3 به همراه $1/5\text{ gr Na}_2\text{SO}_4$ در 100 ml آب مقطر در بازه زمانی ۵ الی ۱۰ ثانیه انجام شد [۱]. مطالعات ریزساختاری نمونه‌ها توسط میکروسکوپ نوری (OM) و میکروسکوپ الکترون روبشی (SEM) صورت گرفت. دستگاه میکروسکوپ الکترون روبشی مورد استفاده در این تحقیق مدل VEGA/XMU ساخت شرکت TESCAN و ولتاژ دستگاه 10 kV انتخاب شد. در راستای تعیین خواص مکانیکی از قبیل استحکام تسلیم، استحکام کشش و درصد ازدیاد طول نسبی، نمونه‌های اکستروژن شده تحت آزمایش کشش تک‌محوری قرار گرفتند. نمونه‌های کشش بر اساس استاندارد ASTM-E8M آماده‌سازی شدند. آزمون کشش توسط دستگاه INSTRON8502 با سرعت $1\text{ میلی‌متر بر ثانیه}$ و در دمای اتاق انجام شد.

۳. نتایج و بحث

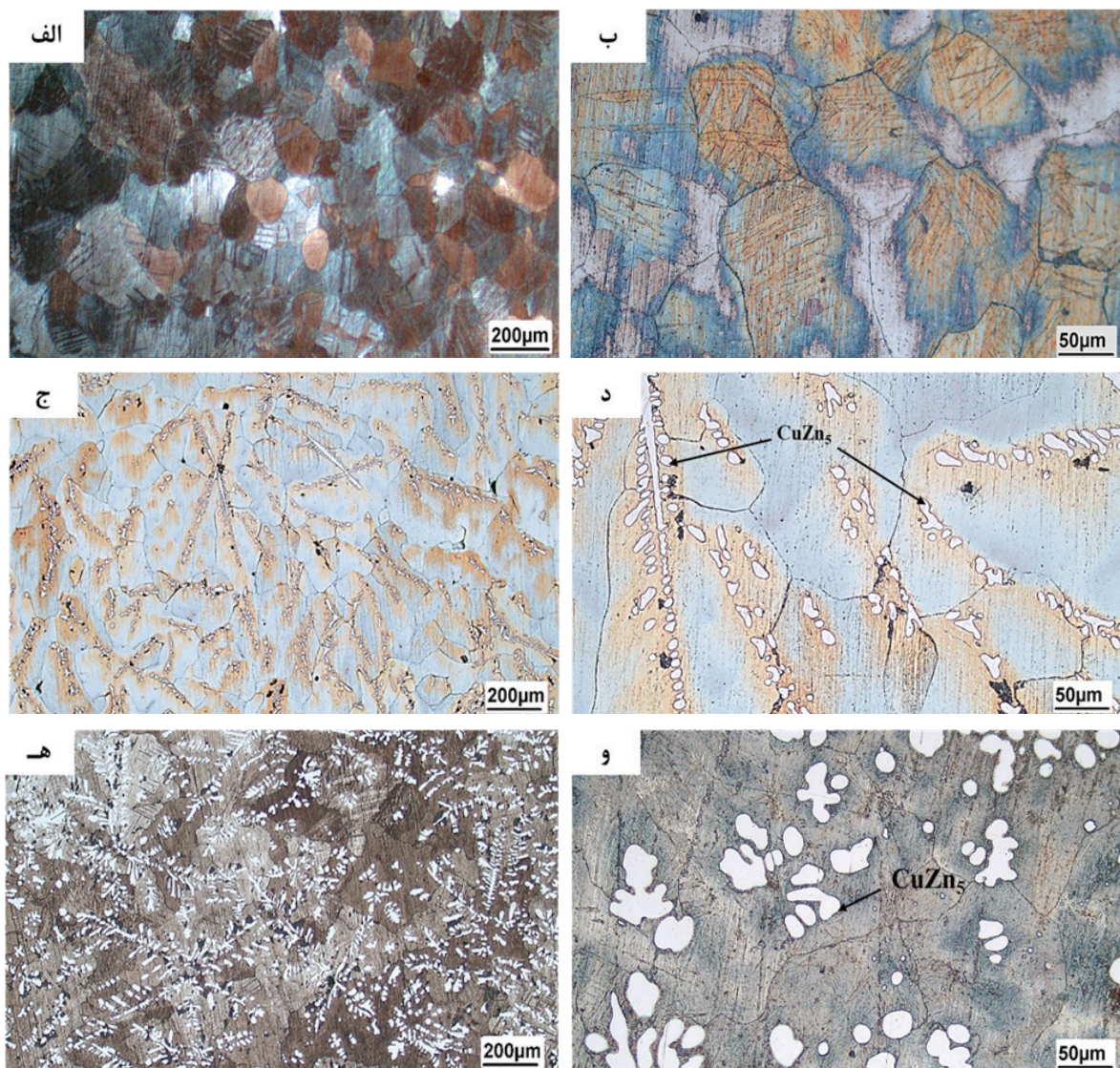
ریزساختار نمونه‌های ریخته‌گری، همگن و اکستروژن شده

تاثیرات مثبتی بر زیست‌سازگاری آن داشته باشند. مس یک عنصر آلیازی رایج در آلیازهای روی است. حضور مس سبب افزایش استحکام، سختی و مقاومت خزشی در این آلیازها از طریق کاهش اندازه دانه، رسوب سختی و محلول جامد شده است [۴-۷].

سیستم‌های آلیاز دوتایی Zn-Cu به دلیل قابل قبول بودن نرخ خوردگی و خصوصیات مکانیکی پتانسیل مناسبی را به عنوان مواد زیست‌سازگار برای کاربردهای ایمپلنت و استنت‌های قلبی عروقی دارا می‌باشند [۱-۷]. روی خالص هیچ اثر ضد باکتریایی قابل توجهی ندارد که دلیل این پدیده مقاومت مطلوب خوردگی روی خالص در محلول معمول شبیه‌سازی شده مایع بدن (c-SBF) و انتشار مقدار کمی یون روی می‌باشد. گزارش شده است که آلیازهای Zn-xCu با بیش از ۲ درصد وزنی مس دارای خواص ضد باکتریایی قوی هستند [۴]. این مطالعات در شرایط و محیط‌های مختلفی صورت گرفته است [۱۶-۱۷]. همچنین مس یک عنصر اساسی در تغذیه انسان است و کمبود این عنصر اثرات زیادی بر رفتارهای عصبی و سیستم ایمنی بدن دارد. عفونت یکی از شایع‌ترین عارضه‌های مربوط به ایمپلنت جراحی است. بیشترین میزان مرگ و میر مربوط به عفونت ایمپلنت‌های جراحی در بین بیماران با استنت‌های قلبی عروقی ثبت شده است [۱۸-۲۱]. درمان این عفونت‌ها علاوه بر پرهزینه بودن، روند بهبود را با تاخیر روبرو کرده و گاهی اوقات منجر به مرگ می‌شود [۲۲، ۲۳]. از اینرو، حضور مس در آلیازهای پایه روی به عنوان یک عامل ضد میکروبی می‌تواند مزیت بسیار خوبی محسوب شود. بعلاوه افزایش عنصر آلیازی مس به روی می‌تواند در بهبود خواص مکانیکی مورد انتظار به عنوان ایمپلنت موثر باشد. از این رو هدف از این پژوهش کاهش محدودیت‌های استفاده از آلیازهای Zn-Cu به عنوان بیوالیاز روی تخریب‌پذیر جهت استفاده در ساخت ایمپلنت و استنت قلب و عروق و در پی آن دستیابی به خواص مکانیکی مناسب این آلیاز تعریف شده است.

۲. مواد و روش تحقیق

در این پژوهش ابتدا آمیزان Zn-11.3Cu از روی و مس خالص تهیه شده و سپس با استفاده از روی خالص و آمیزان تهیه



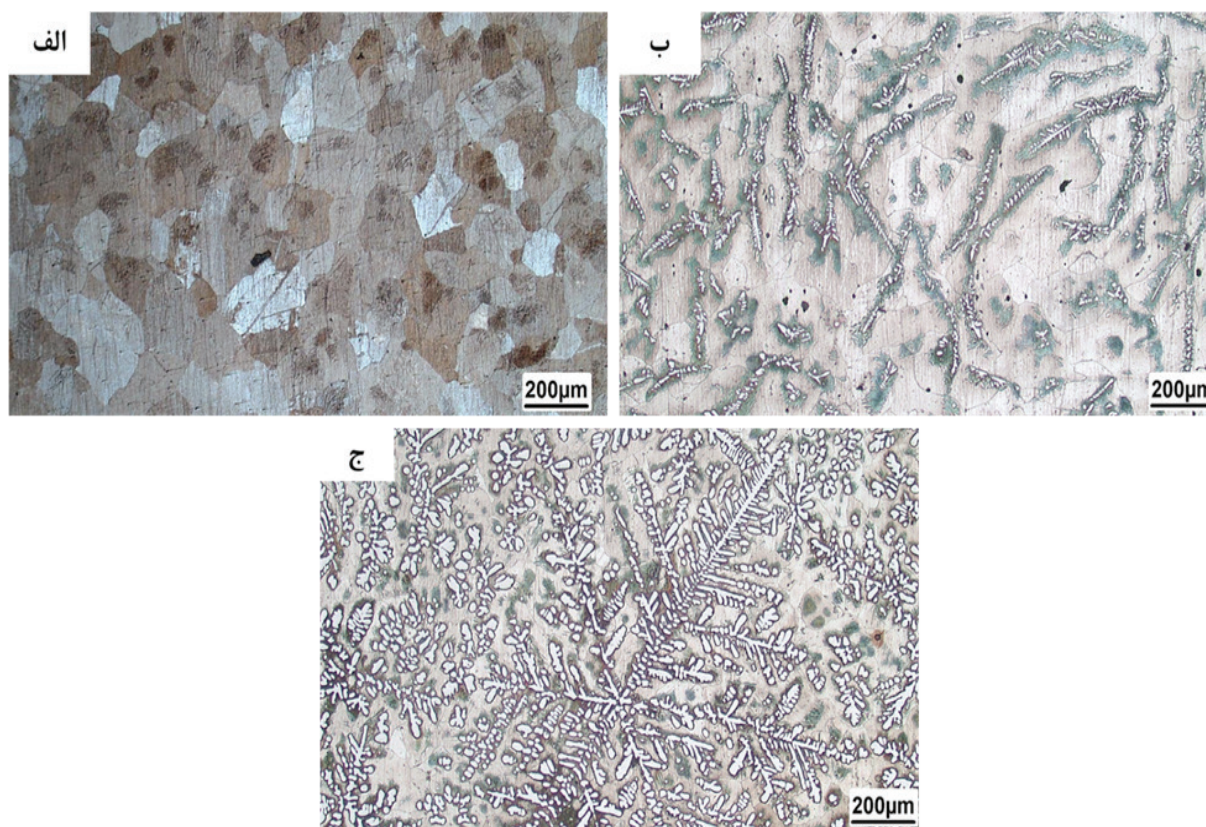
شکل ۱. تصاویر میکروسکوپ نوری از آلیاژ ریختگی Zn-xCu، الف و ب: آلیاژ Zn-1Cu، ج و د: آلیاژ Zn-2Cu، ه و و: آلیاژ Zn-3.5Cu

لحاظ اندازه و مورفولوژی تغییری را نشان نداده که می‌توان چنین استدلال کرد که فاز $CuZn_5$ از نظر حرارتی پایدار است. در این تصاویر کسر حجمی فاز ثانویه (اندازه‌گیری شده از شکل ۱-ه) برای آلیاژ ریختگی حدود $28/183\%$ می‌باشد. همچنین کسر حجمی فاز ثانویه (اندازه‌گیری شده از شکل ۲-ج) برای آلیاژ همگن شده حدود $28/017\%$ می‌باشد که نشان می‌دهد فاز ثانویه با توجه به نکات گفته شده تغییری نداشته است.

طبق دیاگرام فازی دوتایی آلیاژ Zn-Cu، فاز $CuZn_5$ یک فاز پایدار حرارتی تحت واکنش پریکتیک در دمای $425^\circ C$ ایجاد شده که دمای تشکیل این فاز بالاتر از نقطه ذوب روی خالص در دمای $419/6^\circ C$ می‌باشد. بنابراین فاز $CuZn_5$ در طول عملیات حرارتی همگن‌سازی در زمینه روی حل نمی‌شود [۶].

توسط میکروسکوپ نوری مورد مطالعه قرار گرفتند. در نمونه اکستروژن شده، این تصاویر از مرکز نمونه‌ها و از سطح عمود بر جهت اکستروژن تهیه و بررسی شده‌اند. شکل ۱ تصاویر میکروسکوپ نوری مربوط به ریزساختار آلیاژهای ریختگی Zn-xCu را نشان می‌دهد. در این تصاویر، زمینه روی اولیه و فاز ثانویه دندریتی را می‌توان مشاهده کرد [۱]. در آلیاژ Zn-1Cu به دلیل کم بودن مقدار مس تقریباً فاز ثانویه‌ای مشاهده نمی‌شود. با افزایش غلظت مس کسر حجمی فاز ثانویه دندریتی به تدریج افزایش یافته و به همین دلیل فاصله بازوی دندریت‌های ثانویه کاهش می‌یابد.

شکل ۲ تصاویر میکروسکوپ نوری مربوط به ریزساختار نمونه‌های همگن شده آلیاژ ریختگی Zn-xCu در دمای $360^\circ C$ به مدت ۸ ساعت را نشان می‌دهد. کسر حجمی در این تصاویر فاز $CuZn_5$ در مقایسه با تصاویر مربوط به شکل ۱ از



شکل ۲. تصاویر میکروسکوپ نوری از آلیاژ همگن سازی شده Zn-xCu، الف: آلیاژ Zn-1Cu، ب: آلیاژ Zn-2Cu، ج: آلیاژ Zn-3.5Cu

توزیع این فازها در زمینه بیشتر شده است [۱۷ و ۱۵]. محلهای مشخص شده در تصاویر با پیکان، فازهای ثانویه را نشان می دهد.

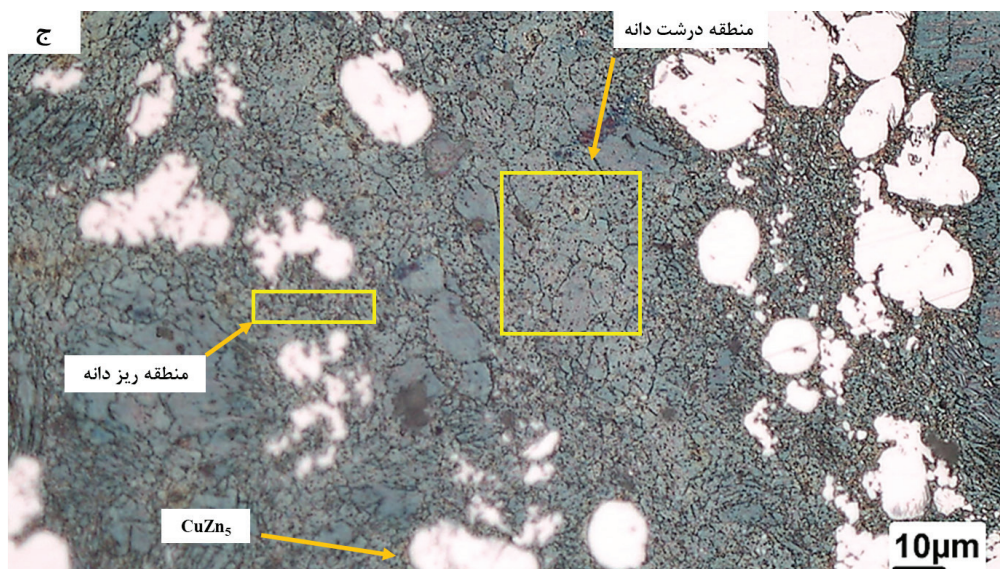
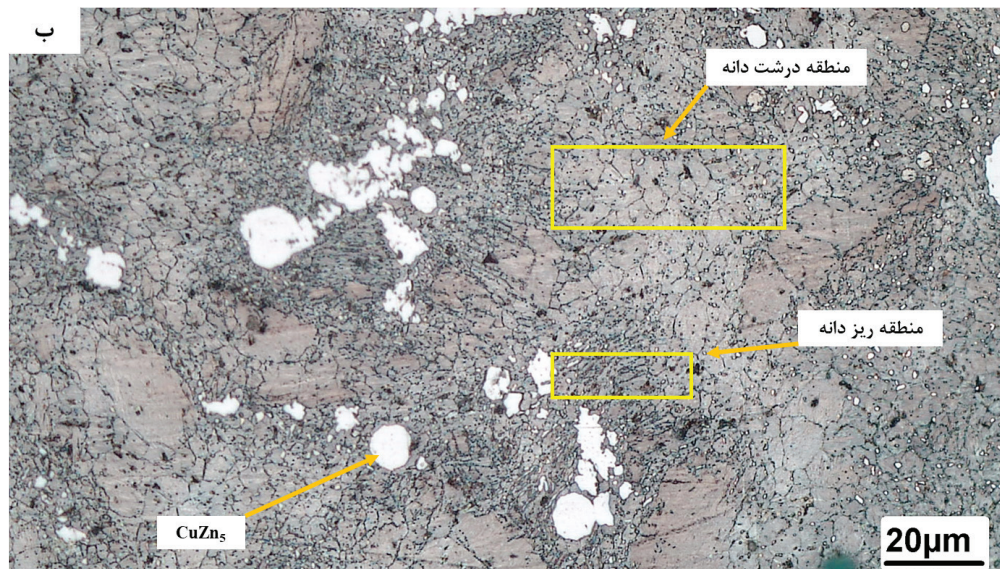
به منظور بررسی دقیق تر ریزساختار ایجاد شده طی عملیتهای ریخته گری و اکستروژن و همچنین ارزیابی دقیق تر فاز ثانویه ایجاد شده از آنالیز (SEM) استفاده شد. شکل ۵ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه های ریخته گری و شکل ۶ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه های اکستروژن شده را نشان می دهد.

در شکل ۵ و شکل ۶ تصاویر میکروسکوپ الکترون روبشی ریزساختار و فازهای موجود در آلیاژهای ریخته گری و اکستروژن شده با ۱، ۲ و ۳/۵ درصدوزنی مس را نشان می دهد. مشاهده شده است که با افزایش درصد مس رسوبات با شکل دندریتی افزایش یافته و پراکندگی این رسوبات در زمینه روی بیشتر شده است. بعد از عملیات ترمومکانیکی اکستروژن ذرات فاز ثانویه خرد شده و در جهت اکستروژن کشیده می شوند [۱۰ و ۱]. به منظور بررسی فاز ثانویه آنالیز EDS از فاز مربوطه در ریزساختار گرفته شده است. شکل ۷ نتایج آنالیز EDS از فاز ثانویه (نقطه علامت گذاری شده) گزارش شده است. نسبت اتمی بین عنصر روی و مس حدود ۵/۵ تا ۷/۵ است، که نشان می دهد فاز ثانویه را می توان به عنوان فاز $CuZn_5$ تأیید کرد. شکل ۸ نمودار تنش- کرنش مهندسی نمونه های اکستروژن

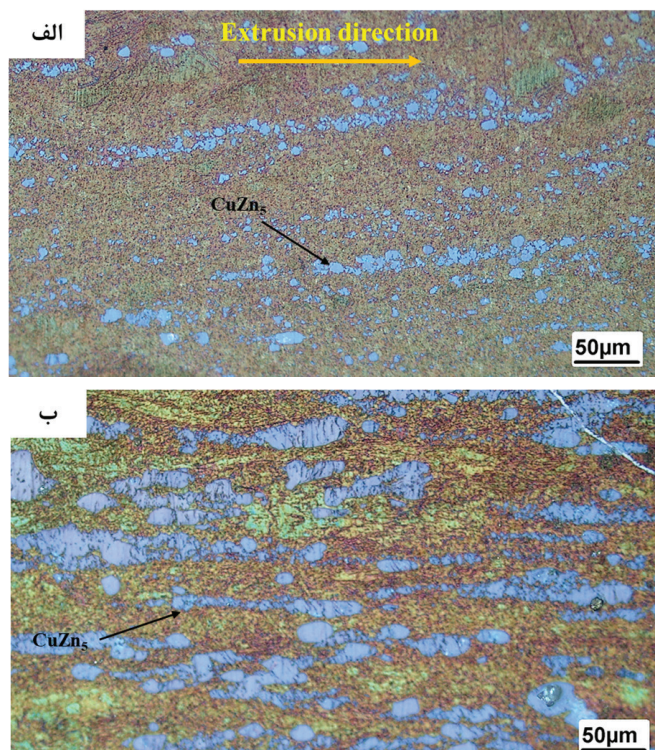
شکل ۳ مربوط به ریزساختار میکروسکوپ نوری آلیاژهای مورد مطالعه پس از فرآیند اکستروژن می باشد. همان طور که در این شکل مشاهده می شود، حین فرآیند اکستروژن گرم فاز ثانویه $CuZn_5$ خرد شده و در جهت اکستروژن کشیده می شود. اندازه دانه نمونه های با فاز ثانویه $CuZn_5$ ناهمگن هستند و دانه های نزدیک به فاز ثانویه $CuZn_5$ نسبت به دانه های دور از فاز ریزتر می باشند. وجود $CuZn_5$ در زمینه روی باعث می شود که ساختار دانه در آلیاژهای اکستروژن شده به دلیل تبلور مجدد دینامیکی در اطراف فاز ثانویه ریزدانه شوند [۱]. ساختار دانه در مجاورت فاز ثانویه نسبت به دانه های دورتر در زمینه، ریزتر می باشند. دلیل این ناهمگونی در ریزساختار را می توان به پدیده جوانه زنی تهییج شده بوسیله ذرات (PSN)¹ نسبت داد. ذرات فاز ثانویه مکان های مرجح برای جوانه زنی و رشد دانه حین تبلور مجدد دینامیکی می باشند. به طور کلی با افزایش غلظت مس، کسر حجمی فاز $CuZn_5$ افزایش یافته و سطح منطقه ریز دانه به تدریج گسترش می یابد [۱-۷ و ۱۵].

شکل ۴ تصاویر میکروسکوپ نوریدر جهت اکستروژن برای آلیاژهای Zn-2Cu و Zn-3.5Cu را نشان می دهد. جهت اکستروژن و همچنین ذرات فاز ثانویه در شکل نشان داده شده اند. مشاهده می شود که فازهای ثانویه خرد شده و در جهت اکستروژن کشیده شده اند. با افزایش درصد مس

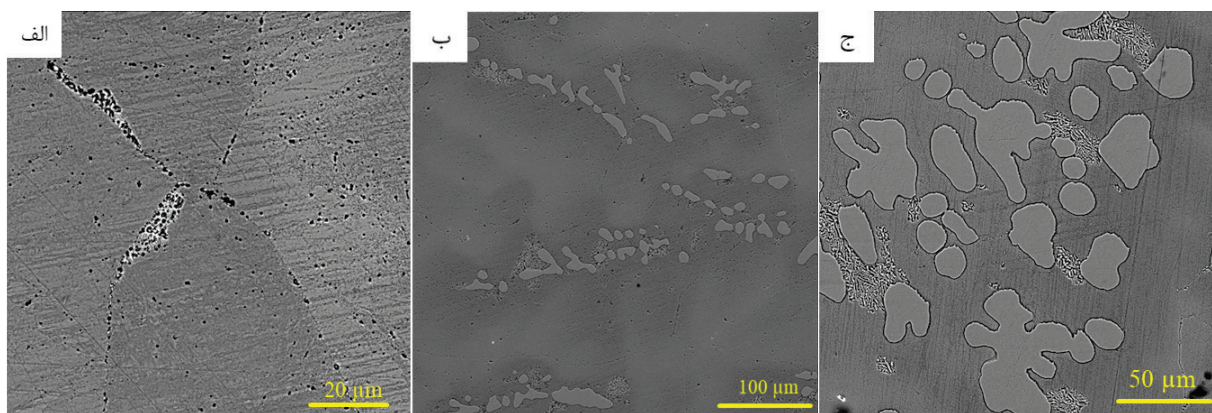
1. particle-stimulated nucleation



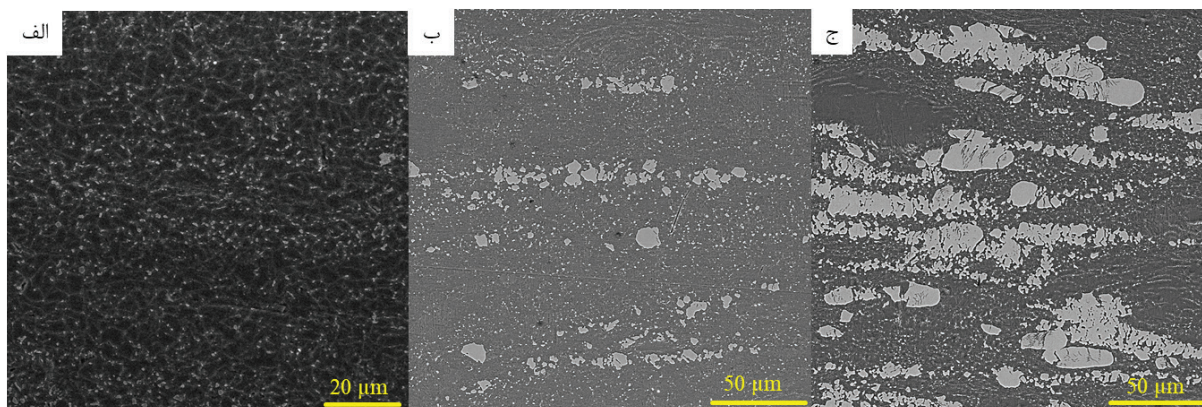
شکل ۳. تصاویر میکروسکوپ نوری از آلیاژ اکستروود شده Zn-xCu، الف: آلیاژ Zn-1Cu، ب: آلیاژ Zn-2Cu، ج: آلیاژ Zn-3.5Cu



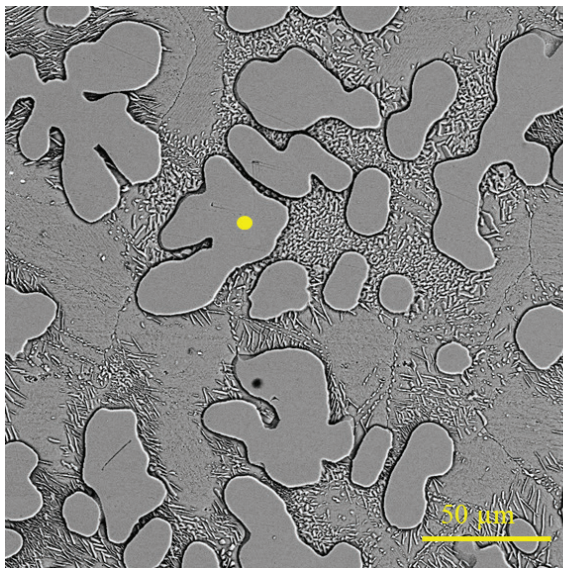
شکل ۴. تصاویر میکروسکوپ نوری از آلیاژ اکسترود شده Zn-xCu در جهت اکسترود، الف: آلیاژ Zn-2Cu، ب: آلیاژ Zn-3.5Cu



شکل ۵. تصاویر میکروسکوپ الکترون روبشی از ریزساختار ریختگی آلیاژ Zn-xCu الف: آلیاژ Zn-1Cu، ب: آلیاژ Zn-2Cu، ج: آلیاژ Zn-3.5Cu



شکل ۶. تصاویر میکروسکوپ الکترون روبشی از ریزساختار نمونه اکسترود شده آلیاژ Zn-xCu الف: آلیاژ Zn-1Cu، ب: آلیاژ Zn-2Cu، ج: آلیاژ Zn-3.5Cu

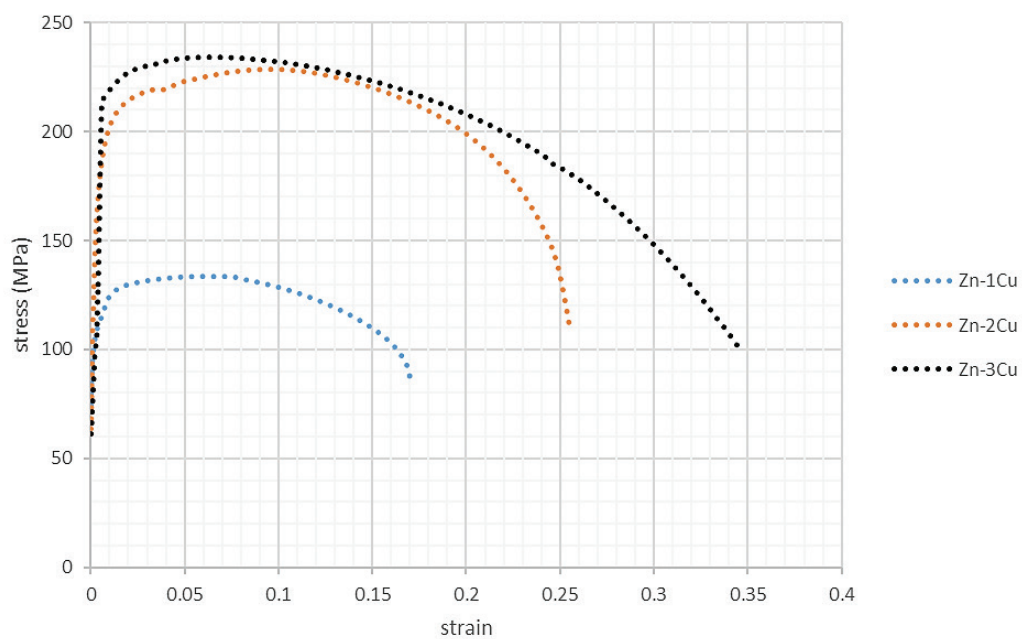


عنصر	درصد وزنی	درصد اتمی
Cu	۱۲/۱۶	۱۲/۴۷
Zn	۸۷/۸۴	۸۷/۵۳

شکل ۷. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از آلیاژ Zn-3.5Cu و آنالیز نقطه ای فاز ثانویه

جدول ۲. نتایج آزمایش کشش برای آلیاژهای اکستروود شده Zn-xCu

نام نمونه	YS (MPa)	UTS (MPa)	Elongation (%)
Zn-1Cu (E)	۱۱۷/۶	۱۳۳/۷	۲۲/۸
Zn-2Cu (E)	۱۹۸/۹	۲۲۸/۶	۳۴/۳
Zn-3.5Cu (E)	۲۱۵	۲۳۴	۴۶



شکل ۸. منحنی‌های تنش-کرنش مهندسی برای آلیاژهای اکستروود شده Zn-xCu

References

- [1] Z. Tang, J. Niu, H. Huang, H. Zhang, J. Pei, J. Ou, G. Yuan, "Potential biodegradable Zn-Cu binary alloys developed for cardiovascular-implant applications," *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.*, vol. 72, pp. 182-191, 2017.
- [2] X. Liu, J. Sun, Y. Yang, F. Zhou, Z. Pu, L. Li, Y. Zheng, "Microstructure, mechanical properties, in vitro degradation behavior and hemocompatibility of novel Zn-Mg-Sr alloys as biodegradable metals," *Mater. Lett.*, vol. 162, pp. 242-245, 2016.
- [3] P. K. Bowen, E. R. Shearier, S. Zhao, S. Zhao, R. J. Guillory II, F. Zhao, J. Goldman, J. W. Drelich "Biodegradable metals for cardiovascular stents: from clinical concerns to recent Zn-Alloys," *Adv. Healthc. Mater.*, vol. 5, no. 10, pp. 1121-1140, 2016.
- [4] E.-L. Zhang, S. Fu, R.-X. Wang, H.-X. Li, Y. Liu, Z.-Q. Ma, G.-K. Liu, C.-Sh. Zhu, G.-W. Qin, D.-F. Chen, "Role of Cu element in biomedical metal alloy design," *Rare Met.*, vol. 38, no. 6, pp. 476-494, 2019.
- [5] G. Li, H. Yang, Y. Zheng, X.-H. Chen, J.-A. Yang, D. Zhu, L. Ruan, K. Takashima, "Challenges in the use of zinc and its alloys as biodegradable metals: perspective from biomechanical compatibility," *Acta Biomater.*, vol. 97, pp. 23-45, 2019.
- [6] P. Li, W. Zhang, J. Dai, A.-B. Xepapadeas, E. Schweizer, D. Alexander, L. Scheideler, C. Zhou, H. Zhang, G. Wan, J. Geis-Gerstorfer, "Investigation of zinc-copper alloys as potential materials for craniomaxillofacial osteosynthesis implants," *Mater. Sci. Eng. C*, vol. 103, p. 109826, 2019.
- [7] Y. F. Zheng, X. N. Gu, and F. Witte, "Biodegradable metals," *Mater. Sci. Eng. R Reports*, vol. 77, pp. 1-34, 2014.
- [8] H. Yang *et al.*, "Evolution of the degradation mechanism of pure zinc stent in the one-year study of rabbit abdominal aorta model," *Biomaterials*, vol. 145, pp. 92-105, 2017.
- [9] H. Tapiero and K. D. Tew, "Trace elements in human physiology and pathology: zinc and metallothioneins," *Biomed. & Pharmacother.*, vol. 57, no. 9, pp. 399-411, 2003.
- [10] H. Yang, C. Wang, C. Liu, H. Chen, Y. Wu, J. Han, Z. Jia "In vitro and in vivo studies on zinc-hydroxyapatite composites as novel biodegradable metal matrix composite for orthopedic applications," *Acta Biomater.*, vol. 71, pp. 200-214, 2018.
- [11] G. Li, H. Yang, Y. Zheng, X.-H. Chen, J.-A. Yang, D. Zhu, L. Ruan, K. Takashima, "Challenges in the use of zinc and its alloys as biodegradable metals: perspective from biomechanical compatibility," *Acta Biomater.*, vol. 97, pp. 23-45, 2019.
- [12] S. Tubek, "Role of zinc in regulation of arterial blood pressure and in the etiopathogenesis of arterial hypertension," *Biol. Trace Elem. Res.*, vol. 117, no. 1, pp. 39-51, 2007.
- [13] B. Turan, "Zinc-induced changes in ionic currents of cardiomyocytes," *Biol. Trace Elem. Res.*, vol. 94, no. 1, pp. 49-59, 2003.
- [14] L. Rink and P. Gabriel, "Extracellular and immunological actions of zinc," *Zinc Biochem. Physiol. Homeost.*, pp. 181-197, 2001.

شده در سه درصد وزنی ۱، ۲ و ۳/۵ مس را نشان می‌دهد. درصد‌های مختلف مس در آلیاژ روی مس سبب تغییر در رفتار مکانیکی این آلیاژ می‌شود. استحکام تسلیم و استحکام نهایی آلیاژهای اکستروود شده Zn-xCu به‌طور قابل توجهی نسبت به روی خالص بهبود پیدا کرده‌اند. نتایج آزمایش کشش روی نمونه‌های اکستروود شده در جدول ۲ به تفکیک گزارش شده‌است. با افزایش درصد مس، کسر حجمی رسوبات $CuZn_5$ افزایش پیدا کرده و در نتیجه خواص کششی آلیاژ Zn-xCu افزایش می‌یابد. بالاترین مقدار استحکام تسلیم ۲۱۵MPa، استحکام نهایی ۲۳۴ MPa و ازدیاد طول نسبی ۴۶٪ مربوط به آلیاژ Zn-3.5Cu بوده است. همان‌طور که در شکل مشخص است با افزایش درصد مس چقرمگی شکست نیز افزایش می‌یابد.

۴. نتیجه گیری

نتایج حاصل از تحقیق را می‌توان به شرح زیر ارائه نمود:

- ۱- پس از اکستروژن گرم، فازهای دندریتی $CuZn_5$ اولیه شکسته شدند و در امتداد جهت اکستروژن توزیع شدند و دانه‌ها به طرز قابل توجهی ریز شدند.
- ۲- اندازه دانه نمونه‌ها با حضور فاز ثانویه $CuZn_5$ ناهمگن بوده به طوری که دانه‌های نزدیک به فاز ثانویه $CuZn_5$ نسبت به دانه‌های دورتر از فاز ریزتر می‌باشند. چنین پدیده‌ای را می‌توان جوانه‌زنی تهییج شده بوسیله ذرات نسبت داد که می‌توان به عنوان مکانیزمی ساده در نظر گرفت که ذرات، تبلور مجدد دینامیکی را تقویت می‌کند. ایجاد ناهمگنی در ریزساختار و کاهش اندازه دانه باعث افزایش استحکام آلیاژها شده است.
- ۳- آلیاژهای Zn-2Cu و Zn-3.5Cu خواص مکانیکی قابل قبولی را برای کاربرد استنت قلبی نشان دادند. بالاترین مقدار استحکام تسلیم ۲۱۵MPa، استحکام نهایی ۲۳۴ MPa و ازدیاد طول نسبی ۴۶٪ مربوط به آلیاژ Zn-3.5Cu بوده است که معیارهای طراحی کلی برای استنت‌های قلبی عروقی را برآورده می‌کند.

- [15] X. Tong, D. Zhang, X. Zhang, Y. Su, Z. Shi, K. Wang, J. Lin, Y. Li, J. Lin, C. Wen., "Microstructure, mechanical properties, biocompatibility, and in vitro corrosion and degradation behavior of a new Zn-5Ge alloy for biodegradable implant materials," *Acta Biomater.*, vol. 82, pp. 197-204, 2018.
- [16] P. K. Bowen, J. Drelich, and J. Goldman, "Zinc exhibits ideal physiological corrosion behavior for bioabsorbable stents," *Adv. Mater.*, vol. 25, no. 18, pp. 2577-2582, 2013.
- [17] D. Apelian, M. Paliwal, and D. C. Herrschaft, "Casting with zinc alloys," *Jom*, vol. 33, no. 11, pp. 12-20, 1981.
- [18] M. Gelfi, E. Bontempi, A. Pola, R. Roberti, D. Rollez, and L. E. Depero, "Microstructural and mechanical properties of zinc die casting alloys," *Adv. Eng. Mater.*, vol. 6, no. 10, pp. 818-822, 2004
- [19] M. Peuster, C. Hesse, T. Schloo, C. Fink, P. Beerbaum, and C. von Schnakenburg, "Long-term biocompatibility of a corrodible peripheral iron stent in the porcine descending aorta," *Biomaterials*, vol. 27, no. 28, pp. 4955-4962, 2006.
- [20] S. awomir Tubek, "Selected zinc metabolism parameters in women with arterial hypotension," *Biol. Trace Elem. Res.*, vol. 116, pp. 73-79, 2007.
- [21] W. Xiang, L. Hong-mei, L. Xin-lin, L. Li, and Z. Yu-feng, "Effect of cooling rate and composition on microstructures and properties of Zn-Mg alloys," *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, vol. 17, no. December, p. China Nonferrous Met Ind Assoc; Cent S Univ, 2007.
- [22] H. Gong, K. Wang, R. Strich, and J. G. Zhou, "In vitro biodegradation behavior, mechanical properties, and cytotoxicity of biodegradable Zn-Mg alloy," *J. Biomed. Mater. Res. Part B Appl. Biomater.*, vol. 103, no. 8, pp. 1632-1640, 2015.
- [23] Z. P. F. Chmelík, Z. Trojanová, P. Lukáč, "No TitleAcoustic emission from zinc deformed at room temperature Part I The influence of strain rate on deformation behaviour and acoustic emission in pure zinc, *Journal of Materials Science Letters*," vol. 12, no. (14), pp. 1086-1087.
- [24] E. Mostaed, M. Sikora-Jasinska, A. Mostaed, S.Loffredo, A.G. Demir, B.Preitali, D.Mantovani, R.Beanland, M.Vedani., "Novel Zn-based alloys for biodegradable stent applications: design, development and in vitro degradation," *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.*, vol. 60, pp. 581-602, 2016.
- [25] C. Shen, X. Liu, B. Fan, P. Lan, F. Zhou, X. Li, H. Wang, X. Xiao, L. Li, Sh. Zhao, Z. Guo, Z. Pu and Yufeng Zheng., "Mechanical properties, in vitro degradation behavior, hemocompatibility and cytotoxicity evaluation of Zn-1.2 Mg alloy for biodegradable implants," *RSC Adv.*, vol. 6, no. 89, pp. 86410-86419, 2016.