



## ساخت ماده هدفمند مس - آهن به روش متالورژی پودر و مشخصه‌یابی مکانیکی آن

سیدمحمد رضا خلیلی<sup>1,2\*</sup>، مریم ترابیان<sup>3</sup>، رضا اسلامی فارسانی<sup>4\*</sup>

1- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

2- استاد معین، مهندسی مکانیک، موسسه تکنولوژی دهلی، دهلی نو

3- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

4- دانشیار، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

\* تهران، صندوق پستی 43344-19991، [eslami@kntu.ac.ir](mailto:eslami@kntu.ac.ir)

### اطلاعات مقاله

دریافت: 95/12/16

پذیرش: 96/4/24

### کلیدواژگان:

ماده هدفمند

متالورژی پودر

ریزساختار

استحکام خمشی

استحکام کششی

### چکیده

ماده هدفمند، نوع جدیدی از کامپوزیت‌ها با ریزساختار ناهمگن هستند که خواص فیزیکی و مکانیکی آن‌ها در راستای ضخامت ماده به صورت پیوسته تغییر می‌کند. در دو دهه اخیر تحقیقات زیادی در زمینه ساخت و تخمین خواص و همچنین تحلیل‌های سازه‌ای و حرارتی ماده هدفمند صورت گرفته است. با تغییر درصد حجمی مواد تشکیل دهنده می‌توان خواص مکانیکی، فیزیکی و ترمودینامیکی مختلفی را از آن‌ها انتظار داشت. در این پژوهش، کامپوزیت هدفمند پنج لایه مس-آهن با تغییر ترکیب لایه‌ها به صورت پله‌ای بین مس خالص و آهن خالص به کمک روش متالورژی پودر ساخته شد. ابتدا پودر فلزات به وسیله پرس در فشار بالا فشرده شد و پس از آن، قطعات خام اولیه برای اتصال بهتر لایه‌ها و افزایش استحکام در کوره مناسب، تفجوشی شدند. برای مقایسه نتایج از دو نوع پرس مختلف شامل پرس تک محوره و پرس ایزواستاتیک سرد برای ساخت قطعات استفاده شد. جهت مشاهده ریزساختار و چگونگی تغییر ترکیب لایه‌های ماده هدفمند، میکروسکوپ نوری مورد استفاده قرار گرفت. نتایج مطالعات میکروسکوپی، اتصال خوب لایه‌ها و ذرات فلز و میزان نسبتاً کم حفره‌ها در هر لایه را نشان دادند. برای تعیین خواص مکانیکی کامپوزیت نیز، نمونه‌های مس-آهن هدفمند ساخته شده مورد آزمایش‌های خمش و کشش قرار گرفتند. نمودارهای تنش-کرنش به دست آمده از آزمایش، افزایش استحکام خمشی و کششی ماده هدفمند مس-آهن را در مقایسه با مس و آهن خالص ساخته شده به روش متالورژی پودر نشان دادند. همچنین پرس ایزواستاتیک سرد در افزایش استحکام قطعات نسبت به پرس تک محوره بسیار موثرتر واقع گردید.

## Fabrication and mechanical characterization of Cu-Fe FGM produced by powder metallurgy method

Seyed Mohammad Reza Khalili<sup>1,2</sup>, Maryam Torabian<sup>1</sup>, Reza Eslami-Farsani<sup>3\*</sup>

1- Faculty of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

2- Department of Applied Mechanics, Indian Institute of Technology Delhi, New Delhi, 110016, India

3- Faculty of Materials Science and Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

\* P.O.B. 19991-43344, Tehran, Iran, [eslami@kntu.ac.ir](mailto:eslami@kntu.ac.ir)

### Keywords

Functionally graded material  
Powder metallurgy  
Microstructure  
Bending strength  
Tensile strength

### Abstract

Functionally graded materials (FGM) are a new type of composites with non-homogenous microstructure, which their physical and mechanical properties vary in the thickness direction continuously. In the past two decades many researches in the field of property estimation, structural and thermal analysis of materials have been targeted. Different mechanical, physical and thermo-dynamical properties can be expected from these materials by changing the containing materials volume fraction. In this research, five layered Cu-Fe FGM specimens were fabricated with changing stepwise in the layers composition between pure copper and pure iron by powder metallurgy method. First the metal powders were compressed by press in high pressures and then the green specimens were sintered in a proper furnace was used to improve the layers connection and to increase the strength of the specimens. Two press systems containing uniaxial press and cold iso-static press were used in the fabrication of specimens to compare the results. Optical microscope was used to observe the microstructure and the combination of FGM layers. The results of microscopic investigations showed fine connectivity of the layers and powders and low density of pores in each layer. The produced Cu-Fe FGM specimens were tested in bending and tension to achieve their mechanical properties. The obtained stress-strain curves of these specimens showed enhancement in flexural and tensile strength of Cu-Fe FGM compared with the existing curves for pure copper and iron made by powder metallurgy method. Also cold iso-static press was highly more effective than uniaxial press in increasing the strength of specimens.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Khalili, S. M. R., Torabian, M. and Eslami-Farsani, R., "Fabrication and mechanical characterization of Cu-Fe FGM produced by powder metallurgy method", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 6, No. 3, pp. 335-342, 2019.

## 1- مقدمه

مواد هدفمند<sup>1</sup> را مواد درجه‌بندی شده تابعی یا متغیر مدرج نیز می‌نامند. در یک ماده هدفمند، ویژگی‌ها و خواص در نقاط مختلف فرق می‌کند و خواص آن به تدریج با تغییر موقعیت اجزاء قطعه تغییر می‌نماید. شیب یا گرادیان می‌تواند تفاوت در پارامترهایی نظیر ترکیب شیمیایی، تخلخل، اندازه تخلخل، میزان حجم فازها، اندازه دانه، چگالی نابعایی‌ها و تنش باقیمانده در نقاط مختلف قطعه باشد. گرادیان در نقاط مختلف قطعه منجر به ایجاد اختلاف در خواص مکانیکی و فیزیکی نقاط مذکور می‌شود. نخستین بار در سال 1972 ایده ترکیب دو فاز مختلف با تغییر در نحوه آرایش و ترتیب لایه‌ها در جهت بهبود خواص مکانیکی مطرح شد. این ایده عموماً مربوط به ضعف مواد مرکب در بسیاری از کاربردها بود. در اواسط سال‌های 1980 برای اولین بار در کشور ژاپن نام علمی متغیر یا مدرج یا هدفمند به این مواد اختصاص داده شد و عصر جدیدی برای تحقیقات گسترده بر روی این مواد گشوده شد.

مواد هدفمند به صورت مواد مرکب و میکروساختار ناهمگن هستند. همچنین خواص مکانیکی آن‌ها به صورت پیوسته و هموار از یک سطح به سطح دیگر تغییر می‌کند. این تغییر پیوسته باعث بروز خواص دیگری در مواد با خواص متغیر می‌شود که در مواد معمولی مشاهده نمی‌گردد. در مواد با خواص متغیر می‌توان بدون هیچ گونه جدایی لایه‌ای از لایه دیگر در دماهای بالا، کارایی لازم را به دست آورد. این ویژگی باعث بروز دو خاصیت می‌گردد؛ که وجود هم‌زمان آن‌ها در مواد معمولی غیرممکن است. در مواد معمولی، افزایش مقاومت در برابر بارهای ناگهانی و مقاومت تسلیم، باعث کاهش خاصیت چقرمگی می‌شود. بنابراین داشتن هم‌زمان مقاومت و شکل‌پذیری بالا میسر نیست. این عیب در مواد با خواص متغیر حل گردیده است. بنابراین می‌توان مقاومت و میزان شکل‌پذیری بالا را در آن‌ها انتظار داشت. این مواد در برابر دماهای بالا، مقاومت زیادی دارند. مواد هدفمند به صورت فلزی، سرامیکی و یا ترکیبی از این دو وجود دارند [1].

روش‌های متعددی برای ساخت مواد هدفمند وجود دارد که شامل متالورژی پودر، ریخته‌گری، ریخته‌گری گریز از مرکز، اسپری پلاسما، رسوب لیزری، رسوب فیزیکی بخار و غیره می‌باشند. در این پژوهش از روش متالورژی پودر برای ساخت ماده هدفمند مورد نظر استفاده می‌شود. متالورژی پودر، روشی برای ساخت و تولید قطعات فلزی و سرامیکی است که اساس آن بر فشردن پودر مواد به شکل مورد نظر و تفجوشی آن است. لازم به ذکر است که تفجوشی در درجه حرارتی زیر نقطه ذوب صورت می‌پذیرد. چرا که در دماهای بالاتر، دامنه نوسان اتم‌ها بیشتر بوده و بنابراین نفوذ اتمی بیشتر می‌شود. اتم‌های ذرات مجاور در یکدیگر نفوذ کرده و ذرات را به هم می‌چسبانند. ساخت قطعات هدفمند توسط فرآیند متالورژی پودر خود شامل روش‌های انباشت پودر، ورق سازی چند لایه، پاشش پودر، ریخته‌گری گریز از مرکز، رسوب‌سازی تحت نیروی گرانش و غیره می‌باشد [2].

ماده هدفمند مس- آهن یک ترکیب ناهمگن از دو فلز با خواص متفاوت است که ترکیب و ساختار آن به صورت درجه‌بندی شده تغییر می‌کند. این ماده هدفمند، خواص آهن همچون مدول یانگ بالا و خواص مغناطیسی ویژه را با ویژگی‌های منحصربه‌فرد مس همانند هدایت حرارتی و شکل‌پذیری عالی ترکیب می‌کند. ماده هدفمند مس- آهن در موارد زیادی کاربرد دارد. این کاربردها شامل کانال‌های سرمایشی (به دلیل هدایت حرارتی زیاد و مقاومت خوردگی خوب)، اجزای راکتورهای هسته‌ای، قطعات الکترونیکی، قطعات

مغناطیسی و غیره می‌باشند. تفاوت نسبتاً کم نقاط ذوب مس و آهن (حدود  $450^{\circ}\text{C}$ )، هم‌پوشانی خوبی برای تعیین محدوده دمای تفجوشی ایجاد می‌کند [3-5].

در سال 1997 کاوازاکی و همکاران به بررسی روش متالورژی پودر در ساخت مواد هدفمند و میزان موفقیت آن پرداختند. آن‌ها ماده هدفمند فسفات سولفوریک روی و فولاد ضد زنگ 304 را ساختند و اثر پارامترهای ساخت مثل فشار و دما را روی خواص آن بررسی کردند [6]. در سال 2000 اوگل و همکارش به وسیله روش تک‌مرحله‌ای فشار گرم، ماده هدفمندی از جنس آلومینیوم، مس و سیلیکون کاربرد تولید نمودند و روند تغییر مدول الاستیک، استحکام کششی و استحکام تسلیم را با تغییر درصد سیلیکون کاربرد بررسی کردند و مشاهده نمودند که خواص مکانیکی کامپوزیت حاصل با افزایش درصد آلومینیوم بهبود می‌یابد [7]. در همین سال ژو و همکارانش ماده هدفمند زیرکونیا اکسید و نیکل کروماید را به همین روش ساختند و مشاهده نمودند که سختی ویکرز این ماده با افزایش مقدار نیکل افزایش می‌یابد [8]. در سال 2005 جین و همکاران وی با روش متالورژی پودر به صورت پرس و تفجوشی در کوره، قطعه هدفمندی از جنس مولایت و مولیبدن ساختند و مورد آزمایش شوک حرارتی قرار دادند. با وجود ایجاد ترک در حین تفجوشی، ماده هدفمند حاصل مقاومت بیشتری نسبت به مولایت خالص در برابر شوک‌های حرارتی از خود نشان داد [9]. در سال 2007 سید و همکارانش ماده هدفمند مس و آهن را به روش رسوب لیزری و به صورت پوششی ساختند. آن‌ها دریافتند که افزودن نیکل به این ترکیب موجب بهبود انتقال حرارت آن می‌شود [10]. در همین سال گلستانین و دو همکارش با روش متالورژی پودر قطعات هدفمندی از جنس سرب و تلوریوم و هم‌چنین سرب، تلوریوم و قلع ساختند که در قطعات ترموالکتریک کاربرد دارد و اثرات دما و زمان تفجوشی را در ریزساختار این قطعات مطالعه نمودند. آن‌ها با کنترل شرایط آئیل کردن، تعادل حرارتی را در قطعات ترموالکتریک حاصل ایجاد نمودند [11].

در سال 2011 نعمت علا و همکارانش تحقیقاتی را روی ماده هدفمند ساخته شده از آلومینیوم و فولاد به روش متالورژی پودر انجام دادند. آن‌ها با آزمایش درصد ترکیبات مختلف از این دو فلز، بهترین ترکیب را از نظر مقاومت به ترک و جدایش در اتصالات یافتند [12]. در سال 2014 کاودار و همکارانش به روش متالورژی پودر ترکیبی از مس و آهن ساختند و با تغییر ترکیب لایه‌ها، استحکام خمشی آن را مورد بررسی قرار دادند. در همین سال ژبونگ و همکارش ترکیب مس و فولاد ابزار هدفمندی را به صورت شش لایه ساختند و تصاویر میکروسکوپی از ترکیب حاصل تهیه نمودند. این محققان به بررسی خواص حرارتی ماده هدفمند حاصل در بهبود انتقال حرارت در کانال‌های سرمایشی پرداختند [15]. در سال 2015 داندان و همکارش یک ماده هدفمند تنگستن و آهن را بررسی کردند که به وسیله فشار سرد و سپس تفجوشی با جریان برق در زمان کوتاه ساخته شد و ریزساختار آن در قالب تصاویر میکروسکوپی مشاهده گردید. با افزایش مقدار تنگستن، سختی ویکرز ماده هدفمند دچار افزایش چشمگیری شد [14]. در همین سال اردمیر و همکاران او ترکیب هدفمندی از آلومینیوم 2024 و کاربرد سیلیسیم را به وسیله متالورژی پودر و از نوع فشار گرم تک مرحله‌ای تولید نموده و رفتار خوردگی و سایشی آن را بررسی نمودند. آن‌ها با افزایش مقدار کاربرد سیلیسیم، تغییر استحکام خمشی را بررسی نمودند و در 40% وزنی کاربرد سیلیسیم به بیشترین استحکام خمشی دست یافتند [15].

<sup>1</sup> Functionally Graded Materials (FGM)

قالبی از جنس سیلیکون با ابعاد  $160 \times 30 \times 10 \text{ mm}^3$  انجام پذیرفت و با خلاء آب بندی شد. گردید، سپس قالب مستقیماً درون محفظه فشار (که حاوی روغن در دمای محیط است)، غوطه‌ور گردید. فشار ایزواستاتیک به میزان 450MPa در همه جهات بر سطح خارجی قالب اعمال شد و پودر را به شکل مورد نظر فشرده نمود. مزیت این روش نسبت به روش پرس تک محوره آن است که در این روش امکان اعمال فشار از تمام جهات وجود دارد. شکل 2، دستگاه‌های پرس تک محوره و پرس ایزواستاتیک سرد را نمایش می‌دهد.

پس از پرس پودرها و تشکیل قطعات خام اولیه، این نمونه‌ها در کوره تفجوشی شدند تا ماده هدفمند مقاوم حاصل شود. جهت جلوگیری از اکسید شدن مس و آهن، کوره خلأ لوله‌ای ساخت شرکت آذر کوره با فشار خلأ  $10^{-4}$  mbar استفاده شد. تفجوشی حالت جامد در دمای  $1000^\circ\text{C}$  (پایین‌تر از دمای ذوب مس) صورت گرفت تا موجب شکل‌گیری پیوند سطحی بین ذرات مجاور گردد. ابتدا دمای کوره با نرخ  $5^\circ\text{C}/\text{min}$  تا  $400^\circ\text{C}$  افزایش یافت. سپس قطعات به مدت 30 دقیقه برای تبخیر استارات روی که در روان‌کاری قالب استفاده شده بود در این دما باقی ماندند. پس از آن دما با همان نرخ افزایش یافت تا به  $1000^\circ\text{C}$  برسد. قطعات به مدت 1 ساعت در این دما تفجوشی شدند و سپس کوره خاموش شده و قطعات به آرامی درون کوره سرد گردیدند. شکل‌های 3 و 4 به ترتیب کوره لوله‌ای خلأ و نمودار چرخه تفجوشی قطعات را نمایش می‌دهند.

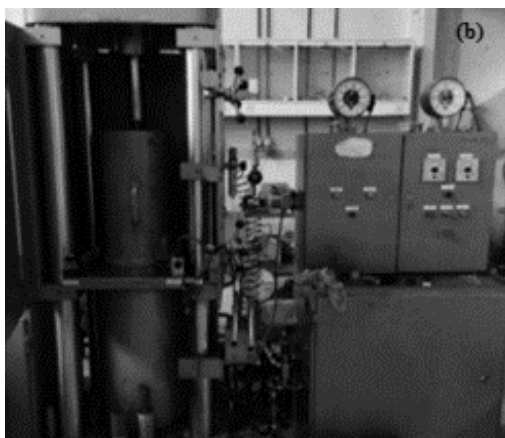
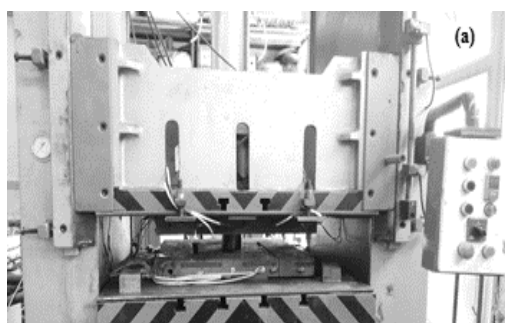


Fig. 2 (a) Uniaxial press, (b) Cold iso-static press equipment  
 شکل 2 دستگاه (a) پرس تک محوره، (b) پرس ایزواستاتیک سرد

در پژوهش حاضر قطعات هدفمند پنج لایه مس- آهن به روش متالورژی پودر ساخته شدند. ساخت نمونه‌ها به صورت پرس لایه‌های پودر در فشار بالا و سپس تفجوشی در کوره انجام شد. پس از ساخت نمونه‌ها، ریزساختار و خواص مکانیکی آن‌ها مانند استحکام‌های خمشی و کششی مورد بررسی قرار گرفتند.

## 2- مواد و روش آزمایش

### 2-1- مواد مورد استفاده

پودرهای مس و آهن استفاده شده دارای اندازه 45 میکرون و خلوص 99% بودند. جدول 1 خواص فیزیکی این دو نوع فلز را نشان می‌دهد. برای اندازه‌گیری وزن پودرهای هر لایه از ترازوی دیجیتال با دقت 0.001 گرم استفاده شد. پس از اندازه‌گیری وزن، پودرهای مس و آهن هر لایه به وسیله یک همزن مکانیکی با دور متوسط 110RPM و به مدت 15 دقیقه مخلوط شدند. این همزن پودرها را به صورت یکنواخت مخلوط کرده و از کلوخه شدن آن‌ها جلوگیری می‌کند.

### 2-2- ساخت و آزمایش نمونه

در این پژوهش ساخت ماده هدفمند به روش متالورژی پودر و از نوع انباشت پودر انجام شد. ترکیب این پودرها با تابع پله‌ای از لایه مس خالص به لایه آهن خالص تغییر می‌کند. شکل 1 طرح‌واره لایه‌چینی پودرها را نمایش می‌دهد. مقدار پودر فلزات هر لایه به‌صورت درصد وزنی بیان شده است.

در مرحله پرس کردن پودر فلزات، از دو نوع پرس مختلف شامل پرس تک محوره و پرس ایزواستاتیک سرد استفاده شد. در روش پرس تک محوره از دستگاه پرس آریا ماشین مدل U25 (که به صورت هم‌زمان دارای قابلیت ایجاد فشار محوری و افزایش دمای نمونه تا  $220^\circ\text{C}$  است)، جهت فشرده سازی پودر فلزات استفاده شد. در پرس تک محوره، لایه‌های پودر مس و آهن درون قالب فولادی استوانه‌ای با قطر 75 mm لایه‌چینی شدند. سپس قالب تحت فشار محوری 220 MPa (100 ton) و دمای  $220^\circ\text{C}$  به مدت 3 ساعت قرار گرفت.

جدول 1 خواص فیزیکی فلزات مس و آهن [17].

Table 1 Physical properties of copper and iron [15]

ماده	چگالی ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	ضریب انبساط حرارتی ( $\mu\text{m}/(\text{m}\cdot\text{K})$ )	دمای ذوب ( $^\circ\text{C}$ )
مس	8960	16.5	1084.62
آهن	7870	11.8	1538

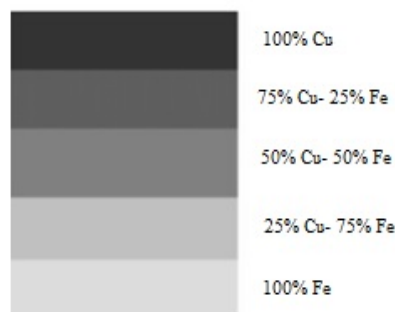


Fig. 1 Layers arrangement of FGM

شکل 1 ترتیب چینش لایه‌های ماده هدفمند

در روش پرس ایزواستاتیک سرد از دستگاه پرس مدل KLP 300E استفاده شد. در این روش، لایه‌چینی پودرهای مس و آهن مطابق شکل 1 در

این استاندارد شامل الزامات نمونه‌های ساخته شده به روش متالورژی پودر برای تعیین خواص مکانیکی آن‌ها همچون استحکام خمشی، کششی، انعطاف پذیری، مقاومت به ضربه و غیره می‌باشد. در شکل 5 ابعاد مورد استفاده قطعات برای آزمایش‌های خمش و کشش آورده شده است [18].  
نمونه‌های ماده هدفمند ساخته شده در این تحقیق به وسیله میکروسکوپ نوری Night Sky BP51 با قابلیت بزرگنمایی 500 برابر، تحت بررسی ریزساختاری قرار گرفتند. آزمون‌های خمش سه نقطه‌ای و کشش نیز روی نمونه‌های ماده هدفمند توسط دستگاه آزمایش یونیورسال Hounsfield با سرعت 0.5 mm/min انجام شد.

### 3- نتایج و بحث

#### 3-1- چگالی

به کمک روش ارشمیدس، چگالی ماده هدفمند ساخته شده به وسیله هر دو نوع پرس حاصل گردید. نسبت چگالی ماده هدفمند ساخته شده به چگالی تئوری برای قطعات فشرده شده با پرس محوری 74% و برای قطعات فشرده شده با پرس ایزواستاتیک سرد 92% به دست آمد. بنابراین پرس تک محوره به دلیل تک جهته بودن فشار و کمتر بودن مقدار آن نسبت به پرس ایزواستاتیک، قطعه هدفمندی با چگالی کمتر ایجاد نمود.

#### 3-2- نتایج ریزساختاری

تصاویری که به وسیله میکروسکوپ نوری از سطح مقطع ماده هدفمند مس- آهن تهیه شده، در شکل‌های 6 و 7 آمده است. شکل 6، ماده هدفمند پنج لایه پرس شده توسط پرس ایزواستاتیک و چگونگی تغییر لایه‌ها از مس به آهن را نمایش می‌دهد. مرز بین لایه‌ها به وضوح در این تصویر مشهود است. تصاویر ریزساختاری لایه‌های این ماده هدفمند نیز در شکل 7 دیده می‌شود. شکل 8 نیز نمایش دهنده ریزساختار لایه‌های ماده هدفمند پنج لایه فشرده شده با پرس تک محوره می‌باشد. همان‌طور که از این تصاویر مشخص است ترکیب ماده هدفمند طی 5 لایه از 100% مس به 100% آهن تغییر می‌کند. در ریزساختار ماده هدفمند فشرده شده با پرس ایزواستاتیک، با وجود اختلاف چشمگیر ضرایب انبساط حرارتی دو ماده مس و آهن، انتظار ایجاد ترک و جدایش در حین تفجوشی وجود دارد، اما هیچ گونه ترک و جدایشی مشاهده نمی‌شود. این امر می‌تواند به واسطه دو نکته زیر در حین مراحل ساخت توجیه گردد:

#### 1- اعمال فشار ایزواستاتیک بسیار بالا

#### 2- نرخ کم و کنترل شده گرمایش و سرمایش در چرخه تفجوشی.

همان‌طور که در شکل 7 دیده می‌شود، اتصال خوبی بین ذرات هر لایه ایجاد شده است. تعداد اندکی حفره در لایه‌ها وجود دارد. به‌طور کلی تصاویر میکروسکوپ نوری نشان می‌دهند که بین ذرات مس و آهن اتصال سطحی خوبی در حین ساخت برقرار گردیده و ریزساختار قابل قبولی ایجاد شده است. اما در شکل 8 میزان بالای فضاهای خالی در ماده هدفمند فشرده شده با پرس تک محوره مشاهده می‌شود. از تصاویر ریزساختاری مشخص می‌گردد که در ماده هدفمند فشرده شده با پرس تک‌محوره با دارا بودن حجم بالایی از حفره‌ها، ریزساختار قابل قبولی ایجاد نشده است. علت این امر این است که ساز و کار ساخت ماده هدفمند با پرس تک‌محوره به‌طور کلی با پرس ایزواستاتیک متفاوت است. در پرس تک‌محوره فشاری یک جهته با مقداری حدود نصف



Fig. 3 Tubular vacuum furnace used in sintering process of specimens

شکل 3 کوره لوله‌ای خلأ مورد استفاده در فرآیند تفجوشی قطعات

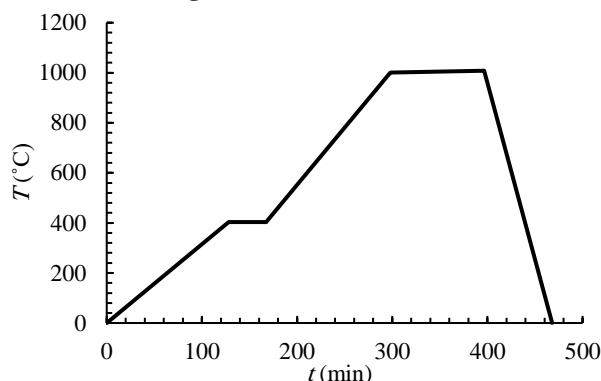


Fig. 4 Sintering cycle diagram of specimens in vacuum furnace

شکل 4 نمودار چرخه تفجوشی قطعات در کوره خلأ

قطعات تفجوشی شده با استفاده از سیستم برش سیم<sup>1</sup> در ابعاد استاندارد آزمایش‌های مکانیکی برش یافتند. در این پژوهش از استاندارد قطعات ساخته شده به وسیله روش متالورژی پودر (ASTM B925) استفاده شد.

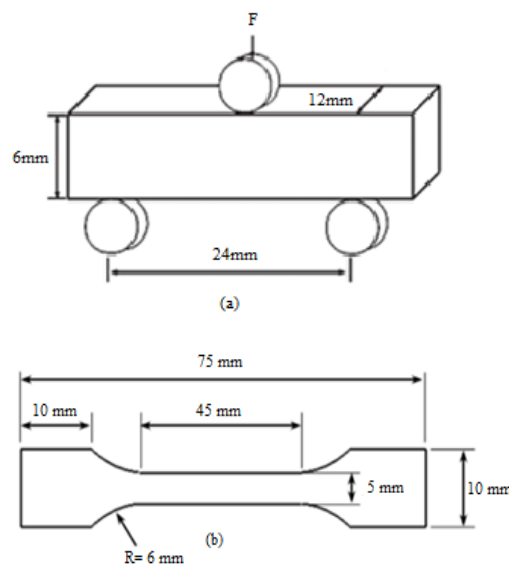
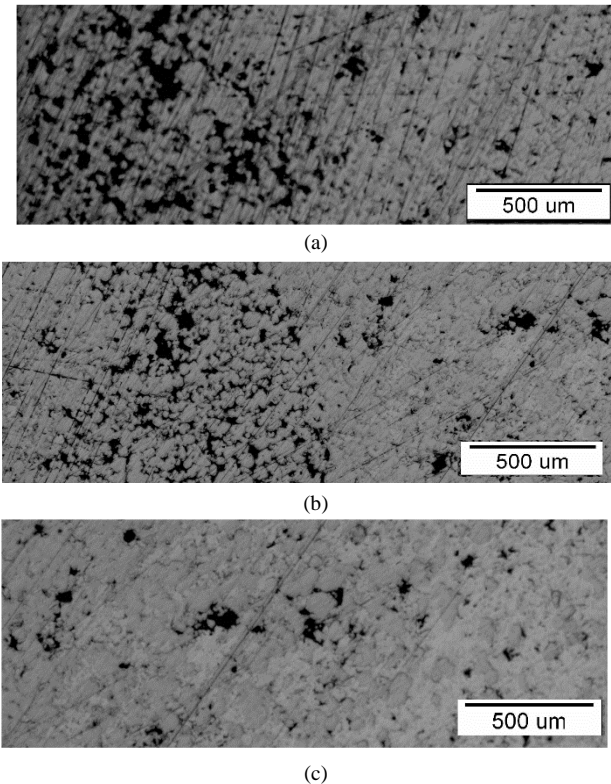


Fig. 5 Standard specimens for tests, (a) bending, (b) tension [16]

شکل 5 قطعات استاندارد آزمایش‌های، (a) کشش، (b) کشش [16]

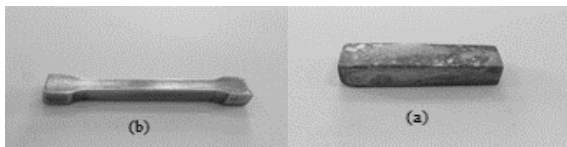
<sup>1</sup> Wire cut

بسیار زیاد استحکام خمشی این نوع ماده گردیده است. لذا این نتیجه حاصل می‌گردد که پرس تک محوره جهت ساخت قطعات با استحکام و کرنش بالا مناسب نیست و پرس ایزواستاتیک سرد به عنوان روش پرس مناسب پیشنهاد می‌شود.



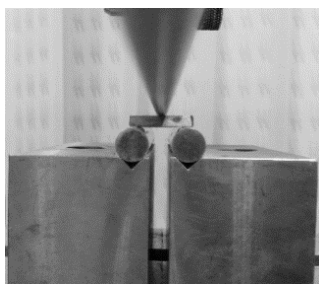
**Fig. 8** Microstructure of FGM layers pressed by uniaxial press, (a) 100% Fe and 75% Fe-25% Cu, (b) 25% Cu-75% Fe and 50% Cu-50% Fe, (c) 75% Cu-25% Fe, and 100% Cu

شکل 8 ریزساختار لایه‌های ماده هدفمند فشرده شده با پرس تک محوره (a) 100% آهن و 75% آهن-25% مس، (b) 25% مس-75% آهن و 50% مس-50% آهن، (c) 75% مس-25% آهن و 100% مس



**Fig. 9** FGM specimens, (a) bending test, (b) tension test

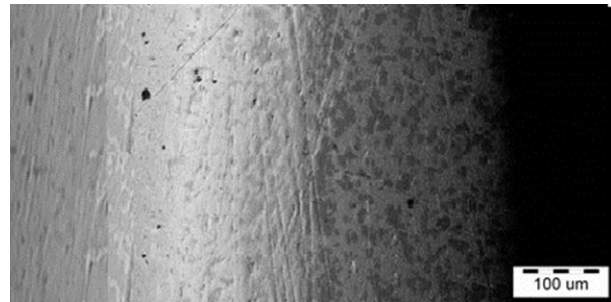
شکل 9 قطعات ماده هدفمند، (a) نمونه آزمایش خمش، (b) نمونه آزمایش کشش



**Fig. 10** Bending specimen during three-point bending test

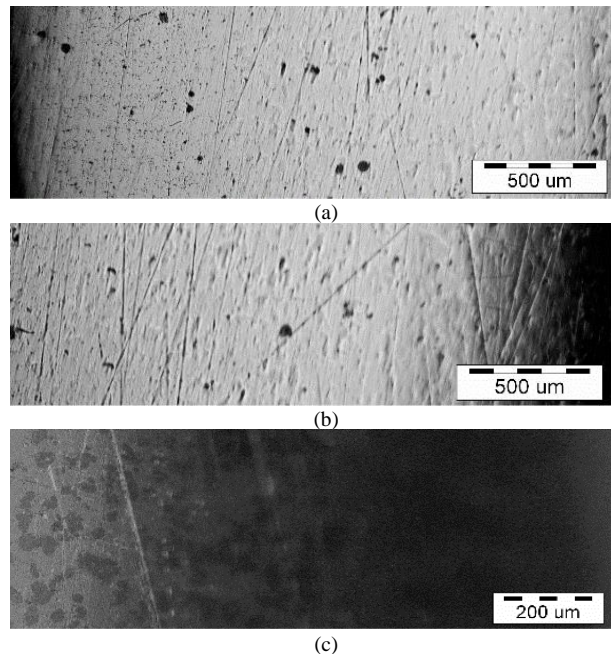
شکل 10 قطعه آزمایش خمش در حین آزمایش خمش سه نقطه‌ای

پرس ایزواستاتیک به لایه‌های پودر وارد شده است و این نوع پرس اتصال خوبی بین ذرات مس و آهن ایجاد نکرده است.



**Fig. 6** Optical microscope image of Cu-Fe FGM cross section

شکل 6 تصویر میکروسکوپی در راستای ضخامت ماده هدفمند مس- آهن



**Fig. 7** Microstructure of FGM layers pressed by cold iso-static press, (a) 100% Fe and 75% Fe-25% Cu, (b) 25% Cu-75% Fe and 50% Cu-50% Fe, (c) 75% Cu-25% Fe, and 100% Cu

شکل 7 ریزساختار لایه‌های ماده هدفمند فشرده شده با پرس ایزواستاتیک سرد، (a) 100% آهن و 75% آهن-25% مس، (b) 25% مس-75% آهن و 50% مس-50% آهن، (c) 75% مس-25% آهن و 100% مس

### 3-3 استحکام خمشی

در شکل 9، تصویر نمونه‌های خمش و کشش پس از برش در ابعاد استاندارد آمده است. همچنین شکل 10 نمونه را در حین انجام آزمایش خمش نمایش می‌دهد. شکل 11 نیز نمایانگر نمودار نیرو-جابجایی بدست آمده از آزمایش خمش نمونه‌های حاصل از هر دو نوع پرس تا لحظه شکست می‌باشد. از مقایسه نمودارهای شکل 11 مشخص می‌شود که استحکام خمشی نمونه‌های پرس شده توسط پرس محوری دارای کاهش مقدار حدود 90% نسبت به نمونه‌های پرس شده توسط پرس ایزواستاتیک سرد هستند. در ساخت ماده هدفمند با پرس تک محوره، به دلیل اعمال فشار در یک جهت، کمتر بودن مقدار فشار پرس (حدوداً نصف فشار ایزواستاتیک) و نوع اعمال پرس (نسبت به فشار هیدرواستاتیک ایجاد شده توسط پرس ایزواستاتیک) میزان حفره‌های داخلی ایجاد شده در ماده هدفمند بیشتر بوده و این تخلخل‌ها موجب کاهش



استحکام و کرنش‌ها به صورت هم‌زمان می‌باشد، ترکیب هدفمند مس- آهن می‌تواند بسیار موثر واقع گردد. این بدان معناست که چقرمگی این ماده هدفمند و جذب انرژی آن نسبت به فلزات خالص مس و آهن بیشتر است.

جدول 2 مقادیر استحکام خمشی و کرنش در منحنی‌های شکل 12

Table 2 Bending strength and strain values in figure 12 curve

کرنش نهایی (mm/mm)	استحکام خمشی نهایی (MPa)	ماده
0.0623	670	مس- آهن هدفمند
0.0793	500	مس [17]
0.0503	693	آهن [17]
0.0278	982	مس- تنگستن هدفمند [19]

### 3-4 استحکام کششی

شکل 13 تصویری از ماده هدفمند در حین انجام آزمون کشش به وسیله دستگاه آزمایش یونیورسال را نشان می‌دهد. شکل 14 نمایانگر نمودار نیرو- جابجایی به دست آمده از آزمایش کشش نمونه‌های حاصل از هر دو نوع پرس سرد تا لحظه شکست می‌باشد. شکل 15 نیز مقایسه‌ای بین منحنی‌های تنش-کرنش آزمایش کشش ماده هدفمند (فشرده شده با پرس ایزواستاتیک) با قطعات متالورژی پودر مس و آهن را به تفکیک نمایش می‌دهد.

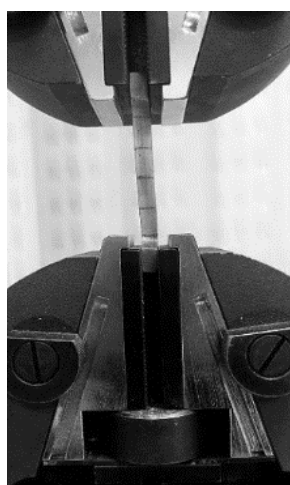


Fig. 13 Tension specimen during test

شکل 13 قطعه آزمایش کشش در حین آزمایش

در آزمون کشش نیز استحکام کششی ماده هدفمند ساخته شده با پرس تک محوره، 92% نسبت به ماده هدفمند فشرده شده با پرس ایزواستاتیک سرد کاهش مقدار دارد. این امر به همان دلایلی که در آزمون خمش ذکر گردید اتفاق می‌افتد. بدین معنا که تک جهته بودن اعمال فشار، نصف بودن مقدار فشار و نوع پرس تک محوره (نسبت به فشار هیدرواستاتیک ایجاد شده توسط پرس ایزواستاتیک) منجر به کاهش قابل ملاحظه استحکام کششی ماده هدفمند می‌گردد. در نتیجه، پرس تک محوره برای ساخت نمونه‌های هدفمند با استحکام بالای کششی نیز مناسب نیست و این نمونه‌ها در بارگذاری‌های کم دچار شکست می‌شوند. بنابراین پرس ایزواستاتیک سرد در ساخت این نمونه‌ها روش بهتری است. مقادیر استحکام و کرنش نمودارهای شکل 15 جهت مقایسه بهتر در جدول 3 آمده اند.

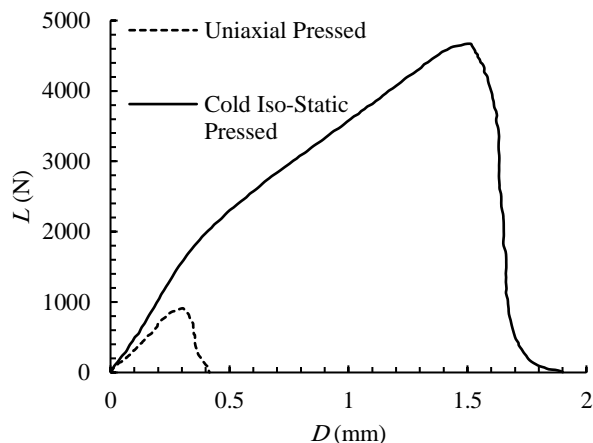


Fig. 11 Load- displacement diagram of Cu- Fe FGM in bending test

شکل 11 نمودار نیرو- جابجایی ماده هدفمند مس- آهن در آزمایش خمش

شکل 12 مقایسه‌ای از نمودار تنش- کرنش حاصل از آزمایش خمش ماده هدفمند مس- آهن ساخته شده در این پژوهش به وسیله پرس ایزواستاتیک سرد را با نمودارهای آزمایش خمش قطعات متالورژی پودر مس و آهن خالص (که در مراجع موجود است)، نشان می‌دهد [17]. جهت مقایسه بهتر نیز در جدول 2، مقادیر استحکام و کرنش مشخص شده در نمودار شکل 12 آمده است.

مطابق نمودار شکل 12 و مقادیر جدول 2، استحکام خمشی نهایی ماده هدفمند مس- آهن نسبت به مس 34% افزایش و نسبت به آهن 3% کاهش یافته است. این در حالی است که به طور کلی در کرنش‌های برابر، میزان استحکام خمشی آهن خالص از ماده هدفمند بیشتر است. همچنین میزان کرنش ماده هدفمند 21% کمتر از مس و 23% بیشتر از آهن است. بنابر پژوهش‌های پیشین، ماده هدفمند مس- تنگستن ساخته شده به روش ریخته‌گری گریز از مرکز دارای استحکامی حدود دو برابر استحکام خمشی مس خالص است [19].

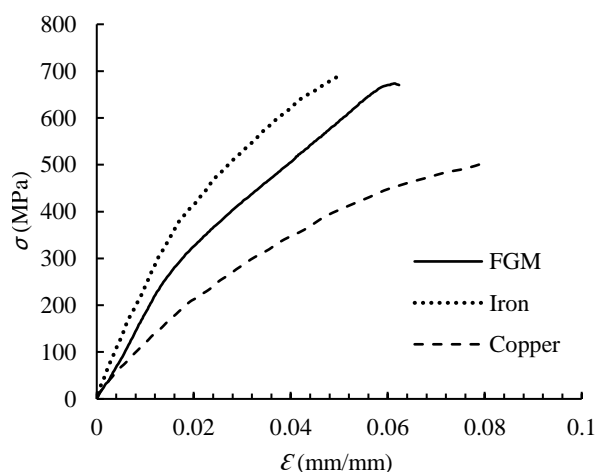


Fig. 12 Stress- strain curves comparison of fabricated Cu- Fe FGM (cold iso-static press) with pure copper and iron in bending test

شکل 12 مقایسه منحنی‌های تنش- کرنش ماده هدفمند مس- آهن ساخته شده (پرس ایزواستاتیک سرد) با مس و آهن خالص در آزمایش خمش

بنابراین ماده هدفمند مس- تنگستن در افزایش استحکام خمشی موفقیت بیشتری نسبت به مس- آهن هدفمند دارد. اما در کاربردهایی که هدف، افزایش

پرس، چرخه عملیات حرارتی تفجوشی و اتمسفر مورد استفاده در کوره می‌باشند. به دلیل تفاوت در خواص فیزیکی و مکانیکی این دو فلز، محدودیت‌هایی در ساخت این ماده هدفمند وجود دارد که اگر به آن‌ها توجه نشود، موجب جدایش لایه‌ها، ایجاد ترک و یا شکست قطعات در حین مراحل ساخت می‌گردد. بنابراین با کنترل همه عوامل، قطعاتی که پس از تفجوشی حالت جامد در دمای بالا به دست آمدند عاری از ترک و شکست‌های مورد انتظار بودند. چنانچه مشاهده گردید، قطعات هدفمند پرس شده با استفاده از پرس تک محوره، در بارگذاری‌های کم دچار شکست گردیدند، در حالی که با استفاده از پرس ایزواستاتیک سرد (که فشار 450MPa را در همه جهات به نمونه‌ها وارد می‌کند)، قطعاتی به دست می‌آید که بارهای کششی و خمشی نسبتاً بالایی را تحمل می‌کنند. تفاوت زیاد خواص حاصل از قطعات هدفمند ساخته شده به کمک این دو نوع پرس به علل مختلفی همچون تفاوت جهت فشار اعمالی، میزان فشار وارد به ماده و تفاوت در شرایط دمایی اعمال فشار مربوط است که منجر به تفاوت قابل ملاحظه در کیفیت ریزساختار، چگالی و در نهایت خواص مکانیکی دو نوع ماده هدفمند ساخته شده به این روش‌ها گردیده است. ساخت ترکیب مس و آهن به صورت هدفمند با نسبت چگالی 92% چگالی تئوری، می‌تواند در کاربردهای بسیاری موجب بهبود خواص مکانیکی ماده خالص گردد. به طور کلی قطعات ماده هدفمند مس و آهن دارای افزایش استحکام به مقدار 34% در خمش و 14.5% در کشش نسبت به قطعات مس خالص ساخته شده به روش متالورژی پودر هستند. همچنین با استفاده از این ترکیب هدفمند، ماده می‌تواند تحت بارگذاری‌های خمشی، مقدار 23% و تحت بارگذاری‌های کششی، مقدار 16% جابجایی‌های بزرگ‌تری را تحمل کند.

جدول 3 مقادیر استحکام کششی و کرنش در منحنی‌های شکل 15

Table 3 Tensile strength and strain values in figure 15 curves

کرنش نهایی (mm/mm)	استحکام کششی نهایی (MPa)	ماده
0.148	252	مس- آهن هدفمند
0.250	220	مس [17]
0.127	260	آهن [17]
0.412	120	مس-نیکل هدفمند [20]

#### 5- مراجع

- [1] Kieback, B. Neubrand, A. and Riedel, H., "Processing Techniques For Functionally Graded Materials" Materials Science and Engineering, Vol. 362, No. 1, pp. 81-106, 2003.
- [2] Sobczak, J. and Ludmil, D., "Metallic Functionally Graded Materials: A Specific Class of Advanced Composites" Journal of Materials Science & Technology, Vol. 29, No. 4, pp. 297-316, 2013.
- [3] Di Maggio, R. et al., "The Microstructure and Mechanical Properties of Fe-Cu Materials Fabricated by Pressure-Less-Shaping of Nanocrystalline Powders" Journal of Materials Science, Vol. 42, No. 22, pp. 9284-9292, 2007.
- [4] Watanabe, Y. et al., "Fabrication of Fiber-Reinforced Functionally Graded Materials by a Centrifugal in Situ Method from Al-Cu-Fe Ternary Alloy" Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol 37, No. 12, pp. 2186-2193, 2006.
- [5] Yadroitsev, I. et al., "Application of Laser Assisted Technologies for Fabrication of Functionally Graded Coatings and Objects for the International Thermonuclear Experimental Reactor components" Journal of Nuclear Materials, Vol. 362, No. 2, pp. 189-196, 2007.
- [6] Kawasaki, A. and Ryuzo, W., "Concept and P/M Fabrication of Functionally Gradient Materials", Ceramics International Journal, Vol. 23, No. 1, pp. 73-83, 1997.

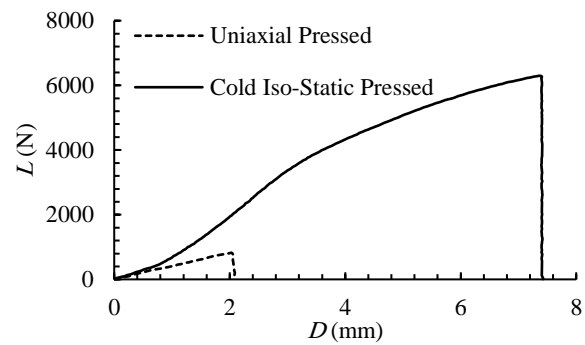


Fig. 14 Load- displacement diagram of Cu- Fe FGM in tension test

شکل 14 نمودار نیرو- جابجایی ماده هدفمند مس- آهن در آزمایش کشش

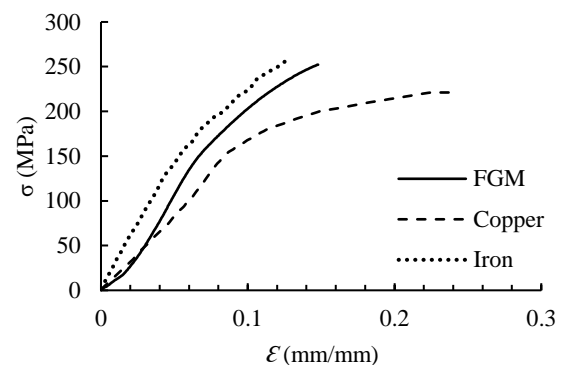


Fig. 15 Stress- strain curves comparison of fabricated Cu- Fe FGM (cold iso-static press) with pure copper and iron in tension test

شکل 15 مقایسه منحنی‌های تنش- کرنش ماده هدفمند مس- آهن ساخته شده (پرس ایزواستاتیک سرد) با مس و آهن خالص در آزمایش کشش

از منحنی‌های شکل 15 و جدول 3 نتیجه می‌شود که استحکام کششی نهایی مس- آهن هدفمند نسبت به مس، 14.5% افزایش و نسبت به آهن، 3% کاهش یافته است. همچنین کرنش ترکیب هدفمند نسبت به آهن، 16% افزایش و نسبت به مس خالص، 40% کاهش یافته است. این در حالی است که ماده هدفمند مس- نیکل که در پژوهش‌های پیشین ساخته شده بود، نسبت به مس خالص 52% استحکام کمتری داشت [20]. با مقایسه نتایج این پژوهش با ماده هدفمند مس- نیکل این نتیجه استنباط می‌شود که ترکیب هدفمند مس- آهن ساخته شده در این پژوهش نقش بسیار موثرتری در افزایش استحکام مواد هدفمند بر پایه مس دارد. بنابراین می‌توان گفت با ساخت این ماده هدفمند می‌توان به استحکام نهایی و کرنش‌های بالاتری نسبت به فلزات خالص تشکیل‌دهنده آن‌ها دست یافت.

#### 4- نتیجه گیری

در این پژوهش ساخت ماده هدفمند مس- آهن 5 لایه با تابع ترکیب پله‌ای و به روش متالورژی پودر انجام پذیرفت. این روش ساخت، نسبت به سایر روش‌ها دارای سهولت و ضریب اطمینان بالاتری می‌باشد و از لحاظ امکانات ساخت، دسترسی بیشتری در آن وجود دارد. با استفاده از این فناوری، امکان تولید قطعات هدفمند مس- آهن با چگالی بالا فراهم شد. همچنین با کنترل بسیار خوب ریزساختارها، بستر ساخت ماده هدفمندی با کیفیت بالا و خواص مناسب ایجاد شد. عوامل زیادی در ساخت موفقیت‌آمیز این ماده هدفمند دخیل هستند که مهم‌ترین آن‌ها خلوص پودرهای مورد استفاده، نوع و میزان فشار در مرحله

- [7] Ogel, B. and R. Gurbuz., "Microstructural Characterization and Tensile properties of Hot Pressed Al-SiC Composites Prepared from Pure Al and Cu Powders" *Materials Science and Engineering*, Vol. 301, No. 2, pp. 213-220, 2001.
- [8] Zhu, J. et al., "Fabrication of ZrO<sub>2</sub>-NiCr Functionally Graded Material by Powder Metallurgy" *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 68, No. 1, pp. 130-135, 2001.
- [9] Jin, G. et al., "Properties of Multilayered Mullite/Mo Functionally Graded Materials Fabricated by Powder Metallurgy Processing" *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 89, No. 2, pp. 238-243, 2005.
- [10] Syed, W. et al., "Single-step Laser Deposition of Functionally Graded Coating by Dual 'wire-powder' or 'powder-powder' feeding—A Comparative Study", *Applied Surface Science* Vol. 253, No. 19, pp. 7926-7931, 2007.
- [11] Gelbstein, Y. Dashevsky, Z. and Dariel, M. P., "Powder Metallurgical Processing of Functionally Graded p-Pb 1-xSnxTe Materials for Thermoelectric Applications" *Physica B: Condensed Matter*, Vol. 391, No. 2, pp. 256-265, 2007.
- [12] Nemat-Alla, M. M. et al., "Powder Metallurgical Fabrication and Microstructural Investigations of Aluminum/Steel Functionally Graded Material" *Materials Sciences and Applications*, Vol. 2, No. 12, pp. 1708, 2011.
- [13] Cavdar, U. et al., "Effect of the Copper Amount in Iron-based Powder-metal Compacts." *Materiali in tehnologije*, Vol. 48, No. 6, pp. 977-982, 2014.
- [14] Jeong, J. S. and Ki-Hoon, Sh., "Property Estimation of Functionally Graded Materials Between M2 Tool Steel and Cu Fabricated by Powder Metallurgy" *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 38, No. 9, pp. 953-958, 2014.
- [15] Dandan, Q. et al., "Characterization of W/Fe Functionally Graded Materials Manufactured by Resistance Sintering Under Ultra-High Pressure" *Fusion Engineering and Design*, Vol. 91, pp. 21-24, 2015.
- [16] Erdemir, F. A. Canakci, and T. Varol., "Microstructural Characterization and Mechanical Properties of Functionally Graded Al<sub>2024</sub>/SiC Composites Prepared by Powder Metallurgy Techniques" *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 25, No. 11, pp. 3569-3577, 2015.
- [17] Eisen, W. B. et al., "ASM Handbook Volume 07: Powder Metal Technologies and Applications" ASM International, USA, Vol. 82, pp. 111-122, 1998.
- [18] ASTM Standard B925- 03, "Standard Practices for Production and Preparation of Powder Metallurgy (PM) Test Specimens ", ASTM International, West Conshohocken, PA, DOI: 10.1520/B0925-15, 2015.
- [19] Zhao, P. et al., "Fabrication of W-Cu Functionally Graded Material with Improved Mechanical Strength" *Journal of Alloys and Compounds*. Vol. 601, pp. 289-292, 2014.
- [20] Delfosse, D. Cherradi, N. and Ilschner, B., "Influence of Residual Stresses on the Tensile Behavior of a Cu-Ni FGM" *International Symposium of Structure Functionally Graded Materaterials*, Vol. 3, 1995.