



## طراحی و ساخت دستگاه ریزنده مواد تابعی و بررسی عملکرد آن در ساخت نمونه آلومینیوم-آلومینا

افشین قانع‌فر<sup>1</sup> و امیر عطریان<sup>2\*</sup>

1- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، گروه مهندسی مکانیک، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران.

2- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران.

\* نجف آباد، صندوق پستی 8514143131، پست الکترونیکی: amiratrian@gmail.com

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 14 مهر 1397

پذیرش: 28 دی 1397

ارائه در سایت: مرداد 1398

### کلیدواژگان:

مواد مرکب

مواد درجه‌بندی شده تابعی

آلومینیوم

آلومینا

### چکیده

هدف از این تحقیق بهینه‌سازی در روش ساخت مواد درجه‌بندی شده تابعی (FGMs) با نوآوری در ساخت دستگاهی به منظور ریزش برنامه‌ریزی شده‌تر، پیوسته و هدفمند مواد برای ساخت نمونه‌های مورد نیاز است. بررسی، بازبینی میکروسکوپی و مطالعه درجه‌بندی تابعی پیش بینی شده در نمونه‌های گوناگون و همچنین مطالعه اثر تغییر درصد حجمی مواد سازنده بر رفتار ریزساختاری، چگالی نسبی و ریزسختی نمونه‌ها از دیگر کارهای این پژوهش می‌باشد. نمونه‌های ساخته شده از ذرات آلومینیوم به عنوان زمینه و ذرات سرامیکی آلومینا به عنوان تقویت کننده، تشکیل شده‌اند. درجه‌بندی تابعی توزیع ذرات آلومینا در زمینه آلومینیوم در راستای طولی یک نمونه استوانه‌ای با بهره‌گیری از یک دستگاه مواد ریز با توانایی ریزش پیوسته و هدفمند، اعمال گردید. پس از ریزش نمونه‌هایی با درصد تقویت کننده 10، 15 و 20 درصد حجمی درون قالب، فشارهای متفاوتی از 200 MPa، 400 MPa و 500 MPa به نمونه‌ها اعمال گردید و فرایند تف جوشی در دمای 700 درجه سانتی‌گراد انجام پذیرفت. نتایج نشان از دقت قابل قبول دستگاه مواد ریز پس از مشاهده توزیع نهایی ذرات تقویت کننده داشت. همچنین، مشخص شد افزایش درصد حجمی آلومینا موجب کاهش چگالی نسبی و افزایش سختی ویکرز نمونه‌ها گردید. به طوری که، بیشترین سختی در نمونه تقویت شده با 20 درصد آلومینا به میزان 95/8 (HV) مشاهده گردید. افزایش فشار تراکم نیز منجر به افزایش چگالی نسبی تا 96% گردید و همچنین، موجب سخت‌تر شدن نمونه‌ها شد. در نمونه 15% افزایش فشار تراکم از 200 به 500 MPa موجب افزایش سختی تا بیش از 2 برابر شده است.

## Designing and manufacturing of functional diffusive machine and its performance evaluation in the fabrication of Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> samples

Afshin Ghaneifar and Amir Atrian\*

Department of Mechanical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

\* P.O.B. 8514143131 Najafabad, Iran, amiratrian@gmail.com

### Article Information

Original Research Paper

Received 6 October 2018

Accepted 18 January 2019

Available August 2019

### Keywords:

Composites

Functionally graded materials (FGMs)

Aluminum

Alumina

### Abstract

In this paper, a novel fabrication technique for functionally graded materials (FGMs) to have a programmed and continuous material pouring is presented. Microscopic examination and studying the desired gradient in various samples as well as studying the effects of volume fraction of constituents on microstructure, relative density and micro-hardness of the samples are other investigations presented in this article. The fabricated samples are made of Al powder as the matrix and Alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ceramic particles as the reinforcement. Functional gradient of Alumina particles distribution in the Al matrix along a cylindrical sample was applied using a novel material pouring device. After pouring the powder mixture with 10, 15, and 20 vol% of reinforcement into the die, various compacting pressures of 100, 200, 400, and 500 MPa were applied to the sample and sintering process under 700 °C temperature was carried out. The results show acceptable accuracy of the material pouring device after examining the distribution of reinforced particles. As well, it is obtained that as the volume fraction of Alumina particles increase, the relative density decreases and the Vickers micro-hardness enhances. So that, the most hardness in 20% Alumina sample is observed about 95.8 HV. In addition, as the compacting pressure increases, the relative density enhances up to 96%. In Al-15 vol% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sample, increasing the compacting pressure from 200 to 500 MPa caused an improvement in micro-hardness by about 200%.

Please cite this article using:

A. Ghaneifar, A. Atrian, Designing and manufacturing of functional diffusive machine and its performance evaluation in the fabrication of Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> samples, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 6, No. 3, pp. 8-19, 2019 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

www.SID.ir

## 1- مقدمه

کاربرد مواد درجه‌بندی‌شده تابعی<sup>1</sup> (FGM)، گسترش روزافزونی دارد و از سپرهای گرمایی برای کیهان‌نوردها گرفته تا بهره‌برداری پزشکی [1-5]، مواد پیزوالکتریک [6] و فلزات سخت برای براده برداری [7] مورد استفاده قرار می‌گیرند. به همین ترتیب، روش‌های ساخت فراوانی نیز برای این مواد وجود دارد [8]. بیشترین رقابت در بهبود روش‌های ساخت این مواد دیده می‌شود [9]، زیرا هر اندازه بتوان به صورتی هدفمند خواص یک ماده را در راستایی از آن برنامه‌ریزی کرد، گستره‌ای از مواد برای نیازهای گوناگون معرفی خواهند شد [10].

روش‌های ساخت FGM گوناگون هست، ولی روش متالورژی پودر که از ذرات خشک مواد بهره می‌گیرد، کم‌هزینه و ساده‌تر است [11، 12]. از جمله این روش‌ها می‌توان به روش انباشت (پشته‌سازی) پودر<sup>2</sup> (قالبی از لایه‌های فشرده) [13، 14]، روش رسوب‌گذاری خشک پیوسته از لایه‌ها<sup>3</sup> [15، 16]، روش اکستروژن [17، 18]، روش فرو بردن دوغاب و ریخته‌گری لغزشی<sup>4</sup> [19، 20]، روش فرایند شکل‌دهی آزاد جامد (SFF)<sup>5</sup> [21، 22] و روش ته‌نشینی گرانشی<sup>6</sup> [23، 24] اشاره کرد که برای ساخت مواد FGM به کار می‌رود. چالش روش متالورژی پودر چینش ذرات سازنده با یک ساماندهی هدفمند (تغییر نسبت حجمی ذرات سازنده در راستای پیش‌بینی‌شده) می‌باشد. از دیدگاه ساده‌سازی طراحی FGM، با گذر پیوسته از یک ماده با ویژگی سخت (و شکننده) تا ماده‌ای با ویژگی منعطف‌تر در یک جزء یکپارچه، کارآمدی بالای این مواد اثبات می‌شود [25]. استفاده از متالورژی پودر، روش مناسبی برای ساخت قطعات با ویژگی‌های متغیر تدریجی به‌وسیله‌ی اختلاط تدریجی دو یا تعداد بیشتری از انواع پودرها است. یکی از مهم‌ترین مزایای این روش در مقایسه با روش‌های ذوبی پایین‌تر بودن درجه حرارت فرآیند است. استفاده از یک قطعه با تغییرپذیری تدریجی ضریب انبساط حرارتی، اجازه می‌دهد تا تنش ظاهرشده از لحاظ دمایی در هنگام چرخه‌ی مونتاژ یا پس از سرد شدن قطعات مونتاژ شده در حین چرخه‌ی جوش سرامیک و اجزای فلزی کاهش پیدا کند [8 و 9]. در روش متالورژی پودر، نمونه خام در دمایی پایین‌تر از نقطه‌ی ذوب اجزای آن تف‌جوش می‌شود.

در فرایندهای ساخت FGM که از روش متالورژی پودر با دست انجام می‌گیرد بایستی درصد وزنی مواد سازنده در هر لایه محاسبه و سپس این مواد پس از وزن کردن برای هر لایه با هم آمیخته و لایه‌لایه در قالب چیده شود که افزون بر اتلاف زمان زیاد از دقت کافی برخوردار نبوده و گسستگی بین لایه‌ها دیده می‌شود و مسلماً به خواص مطلوب FGM برنامه‌ریزی‌شده نخواهد رسید [26-28].

گوپتا و همکاران [29] در یک تحقیق، تکنولوژی ساخت مواد تابعی با استفاده از روش ساده فشار و پختن<sup>7</sup> را با مواد TiB<sub>2</sub> و Al7075 مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که افزایش مقدار TiB<sub>2</sub> در ترکیب و افزایش زمان پخت باعث افزایش سختی می‌شود. کانکی و همکاران [30] نیز سه نوع مختلف مواد Al-B<sub>4</sub>C به صورت مواد تابعی با استفاده از روش متالورژی پودر ساختند. مخلوط‌های پودر Al-B<sub>4</sub>C در دو فشار مختلف (400 و 500 مگاپاسکال) فشرده شده و در دمای 600 درجه سانتی‌گراد به مدت 3 ساعت در محیط آرگون جوشیده شدند. نتایج بررسی آنها نشان داد که خواص مکانیکی مواد تابعی Al-B<sub>4</sub>C به شدت به تغییرات درصد مواد بستگی دارد. آماده‌سازی و بررسی خصوصیات مواد تابعی Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> با استفاده از روش متالورژی پودر توسط لطیفی و همکاران [31] انجام شد. ساندوین و همکاران [32] نیز به مطالعه روش ساخت دیسک‌های ساخته شده از مواد تابعی آلومینیوم با استفاده از فرایند متالورژی پودر پرداختند.

هدف اصلی این پژوهش، طراحی، ساخت و بررسی عملکرد دستگاه مواد ریز برای ریزش اجزاء سازنده مواد تابعی با نسبت پیش‌بینی‌شده می‌باشد. برای منظور اطمینان از عملکرد دستگاه طراحی شده، نمونه‌های استوانه‌ای شکل با درصدهای حجمی پیش‌بینی‌شده از ماده آلومینا و آلومینیوم تحت فشارهای 200MPa، 400 MPa و 500 MPa متراکم شدند. پس از فرایند تف جوشی، نمونه‌ها در راستای طولی استوانه برش و برای متالوگرافی پولیش داده شد. نمونه‌های پولیش خورده از دیدگاه ساختاری و ریزساختاری بررسی می‌شوند تا میزان نزدیکی درجه‌بندی مواد سازنده نمونه‌ها با درجه‌بندی پیش‌بینی‌شده آشکار شود. همچنین، اثر فشار تراکم و تغییر درصد حجمی بخش‌های سازنده بر ریزسختی و ریزساختاری بررسی گردید.

<sup>1</sup> Functionally Graded Materials

<sup>2</sup> Powder stacking

<sup>3</sup> Continuous dry deposition of layers

<sup>4</sup> Slurry dipping and slip castings

<sup>5</sup> Solid freeform fabrication

<sup>6</sup> Gravity sedimentation

<sup>7</sup> Simple pressing and sintering method

## 2- مواد و روش‌ها

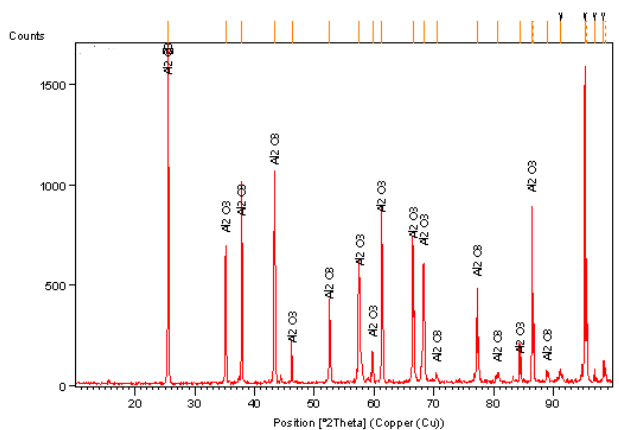
### 1-1- مواد اولیه

نمونه‌های FGM ساخته شده در این پژوهش از دو ماده پودری شکل آلومینیوم به عنوان زمینه (با خلوص 99/6 درصد و اندازه ذرات متوسط 45 μm) و آلومینا به عنوان تقویت کننده (با بیشترین خلوص 99/09 درصد و اندازه متوسط ذرات 100 μm) ساخته شده‌اند. در جدول 1 ویژگی‌های ترکیب شیمیایی ماده آلومینیوم مصرفی دیده می‌شود. در شکل 1 نمودار XRD مربوط به پودرهای آلومینا و آلومینیوم آورده شده است.

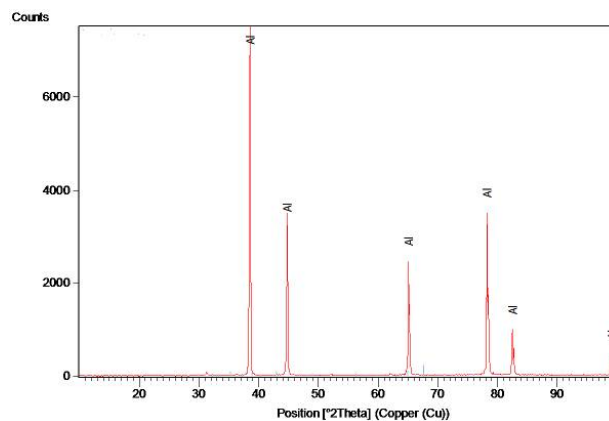
جدول 1 ویژگی‌های ترکیب شیمیایی آلومینیوم به کار برده شده

Table 1 The properties of the chemical compound of aluminum are used

Element	Content (%)	Element	Content (%)
Al	99/6	Ca	0/0083
Si	0/0658	Pb	0/0286
Cu	0/0141	Fe	0/0169
Mg	0/0025	Na	0/0046
Zn	0/0188	Ga	0/0043
Ni	0/0174	Sn	0/0210



(الف)



(ب)

Fig. 1 Chart xrd (a) Aluminum Alumina (B) Aluminum powder  
 شکل 1 نمودار XRD (الف) پودر آلومینا (ب) آلومینیوم

از روی کدبندی آلومینا می‌توان گفت که آلومینای به کار برده شده در ساخت این نمونه‌ها از فاز آلفا بوده که مشخصه اصلی آنها دیرگدازی است.

### 2-2- طراحی و ساخت دستگاه ریزنده مواد

در طراحی این دستگاه، برای افزایش توانایی در ایجاد چیدمان‌های پیش‌بینی شده‌تر از مواد به دو خط خوراک دهنده مواد، با دبی متغیر و برنامه‌ریزی شده نیاز می‌باشد. بنابراین، به مدارهایی برقی که بتواند پیش‌رانه‌های دستگاه را برای این کار برنامه‌ریزی کند، نیاز می‌باشد. مدار به گونه‌ای برنامه‌ریزی شده که می‌توان در یک بازه زمانی پیش‌رانه را با دوره‌های گوناگونی به حرکت درآورد. این بدان معناست که می‌توان برون‌ریزی مواد را برای هر سیلندر به صورت جداگانه تعریف و برنامه‌ریزی کرد و در این صورت اگر در یک فرآیند پودر ریزی با دو ماده، هر ماده در یک خط موادریز قرار گیرد، می‌توان به درجه‌بندی‌های بسیار گوناگون و پیوسته‌ای از چیدمان پودرها دست یافت که از مهم‌ترین هدف‌های این تحقیق می‌باشد. با تغییر دور پیش‌رانه، حجم خروجی مواد تغییر می‌کند. بنابراین به آسانی می‌توان برای هر بخش از FGM، حجم ریزش مواد را پیش‌بینی و نسبت به آن تعداد دوری که باید موتور برقی داشته باشد را حساب و برنامه ریزی کرد. از قیف‌های اضافه می‌توان برای وارد کردن مواد دیگر به فرآیند یا مواد مشابه با تغییر دانه بندی استفاده کرد.

دستگاه طراحی شده در شکل 2 نشان داده شده است. در این دستگاه همچنین امکان داشتن درجه‌بندی‌های گوناگون، به دلیل وجود کنترل دور موتور که امکان می‌دهد با دوره‌های متفاوت شتاب بیرون‌ریزی مواد تغییر کند، وجود دارد.

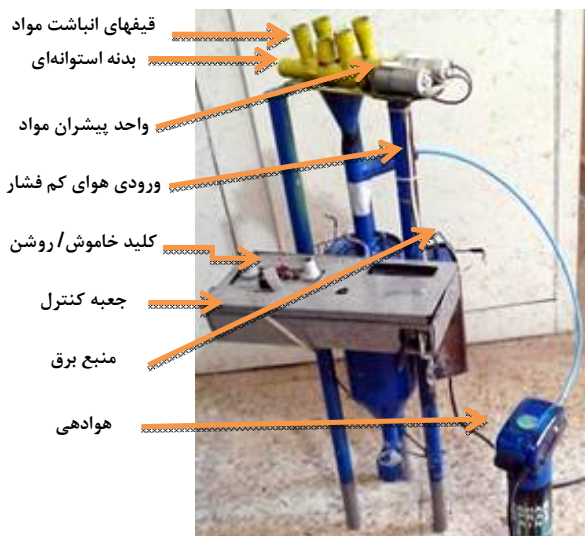


Fig. 2 Designed device for pouring material

شکل 2 دستگاه طراحی شده ریزنده مواد

چگالی آلومینیوم  $2/7 \text{ g/cm}^3$  و چگالی آلومینا  $3/95 \text{ g/cm}^3$  در محاسبات در نظر گرفته شده است. وزن هر نمونه 8 گرم در نظر گرفته شده و اندازه وزن مواد مصرفی در همه نمونه‌ها از روابط (1) و (2) حساب شده است.

$$\rho_{FGM} = \rho_{Al}V_{Al} + \rho_{Al_2O_3}V_{Al_2O_3} \quad (1)$$

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (2)$$

در رابطه (1)،  $\rho$  چگالی و  $V$  درصد حجمی را نشان می‌دهند. با داشتن چگالی آلومینیوم و آلومینا و درصد حجمی هر نمونه، از رابطه 2 می‌توان چگالی تئوری هر نمونه را به دست آورد. چگالی نمونه 10 درصد آلومینا  $2/825 \text{ g/cm}^3$ ، 15 درصد آلومینا  $2/950 \text{ g/cm}^3$  و چگالی نمونه 20 درصد آلومینا  $2/888 \text{ g/cm}^3$  محاسبه شد. و از رابطه چگالی، حجم تئوری نمونه‌ها به ترتیب،  $2/83 \text{ cm}^3$ ،  $2/77 \text{ cm}^3$ ،  $2/71 \text{ cm}^3$  برای نمونه‌های 10، 15 و 20 درصد آلومینا به دست آمد. همان‌طور که در شکل 4 قابل رویت است، برای ساخت هر نمونه پس از فرایند وزن‌کشی بر طبق درصد حجمی محاسبه‌شده، پودرهای آلومینیوم و آلومینا در دو خط مواد ریز دستگاه درون قیف‌های دستگاه بارگیری شدند و دستگاه با یک درجه‌بندی پیش‌بینی‌شده برای چیدمان آلومینا در زمینه‌ی آلومینیوم برنامه‌ریزی شد. پس از بارگیری مواد در قیف‌های نگه‌دارنده مواد دستگاه، قالب فلزی استوانه‌ای در پایین آن جای گرفت و با روشن کردن دستگاه، مواد پودری شکل با همان درجه‌بندی پیش‌بینی‌شده به درون قالب فلزی راهنمایی شدند. نمونه‌های ایجادشده از سه بخش تشکیل شده‌اند. بخش اول تنها از آلومینیوم تشکیل شده است. با پیش روی به سمت میانه نمونه، شمار ذرات سرامیک آلومینا افزایش می‌یابد و در واقع بخش دوم که ترکیبی از آلومینیوم و ذرات سرامیک آلومینا است، دیده می‌شود. پس از رسیدن به لایه‌ای که بیشترین شمار ذرات سرامیک در آن دیده می‌رود، کاهش دوباره ذرات سرامیک رویت می‌شود. همان‌گونه که در شکل 4 قابل مشاهده است، بیشینه مقدار آلومینا در لایه میانی FGM بایستی ایجاد شود.

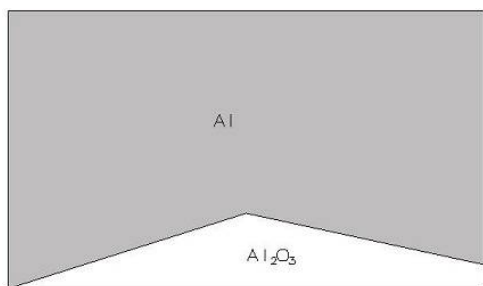


Fig. 4 Schematic view of the considered functional gradient

شکل 4 نمودار شماتیک تابع درجه‌بندی مورد نظر

وجود لرزاننده که از چسبیدن و انباشت مواد جلوگیری می‌کند، بخش دیگر این دستگاه می‌باشد. در این دستگاه، افزایش حجم مواد ریزی با تعویض قیف‌های بالایی امکان پذیر می‌باشد. همچنین، به دلیل کارکرد پیچ درون سیلندر که اجازه انباشت پودرها را نمی‌دهد، انباشتگی کمتر پودرها در مواد ریز رخ می‌دهد. ریزش مواد به صورت پیوسته، بهبود آمیختگی مواد به دلیل رسیدن هم زمان هر دو پودر به دهانه قیف گردآوری پودرها، کم شدن انباشتگی پودرها به دلیل جدایش مواد ریزی هر پودر، داشتن دو خط جداگانه خوراک‌دهی پودرها با توانایی برنامه‌ریزی هدمند، کمتر شدن کارهای دستی، پیوستگی فرایند، کم کردن زمان مواد ریزی برای یک درجه‌بندی یکسان از پودرها، توانایی مواد ریزی پودرهای بیشتر با جنس و دانه‌بندی گوناگون از مهمترین ویژگی‌های این دستگاه می‌باشد.

### 2-3- تراکم تک محوری مخلوط پودر با چیدمان تابعی

نمونه‌های استوانه‌ای شکل با قطر 15 میلی‌متر و طول نزدیک به 20 میلی‌متر پیش‌بینی شدند. با توجه به آزمایش‌های گوناگون و فشردگی پودرها در راستای قالب، طول قالب تقریباً سه برابر قطر در نظر گرفته شد. همچنین، پس از آزمایش‌های پرشمار، درون قالب به‌منظور کاستن از اصطکاک و بیرون آمدن روان‌تر پودرها کروم اندود شد. همان‌طور که در شکل 3 نشان داده شده است، قالب از جنس فولاد معمولی و از سه بخش بدنه اصلی و دو سنبه در بالا و پایین تشکیل شده است. پس از ریخته شدن پودر به داخل قالب، نمونه تحت فشار تک محوری به مقادیر 200MPa، 400 MPa و 500 MPa قرار گرفت و سپس جهت زینتر شدن ذرات، داخل کوره با دمای 700 درجه سانتی‌گراد قرار داده شد.

در این پژوهش سه نوع نمونه FGM ساخته شده است. نمونه‌هایی که درصد آلومینا در آن 10%، 15% و 20% حجمی بوده و بقیه فاز سازنده همه از آلومینیوم تشکیل شده است.

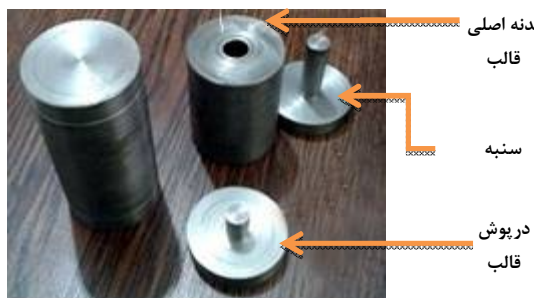


Fig. 3 Powder compaction die set

شکل 3 قالب تراکم پودر

نمونه مورد آزمایش آنالیز عنصری EDS قرار گرفت. همه نمونه‌ها با دستگاه میکرو سختی ویکرز در مقطع برش طولی نمونه بررسی شدند. نیروی به کار رفته 0/5 کیلوگرم نیرو و مدت بارگذاری 10 ثانیه و فاصله نقطه تا نقطه 0/3 میلی‌متر بود (استاندارد ASTM E384).

### 3- بحث و نتایج

#### 3-1- چگالی

در شکل 6 نمودار تغییرات چگالی نسبی سه نمونه با درصد‌های متفاوت آلومینا آورده شده است. این نمونه‌ها در فشار 400 MPa فشرده شده‌اند. همان‌طور که از نمودار پیداست با افزایش درصد ذرات آلومینا، چگالی نسبی کاهش می‌یابد. اساساً، تراکم و تف جوشی مواد کامپوزیتی از مواد تک فاز متفاوت است. وجود ذرات سخت سرامیکی مانند آلومینا (تقویت کننده) بین ذرات نرم آلومینیومی (زمینه) قابلیت تراکم ماده را کاهش می‌دهد و از این روی، با افزایش درصد فاز تقویت کننده چگالی نسبی نمونه نهایی کاهش می‌یابد [37 و 38]. همچنین، واضح است که فشار تراکم بالاتر موجب پر شدن بیشتر حفره‌ها و تراکم بیشتر پودر شده و در نتیجه، چگالی نسبی بالاتری را حاصل می‌سازد (شکل 7).  
با برش دادن در چهار نقطه در راستای طولی یک نمونه با 20 درصد آلومینا که در فشار کاری 450 MPa فشرده شده است، چگالی بخش‌های جدا شده با استفاده از روش ارشمیدس محاسبه گردید. تغییرات چگالی نقطه‌ای در طول نمونه همانند تغییرات درجه‌بندی تابعی مورد نظر به وضوح در شکل 8 مشاهده می‌شود.

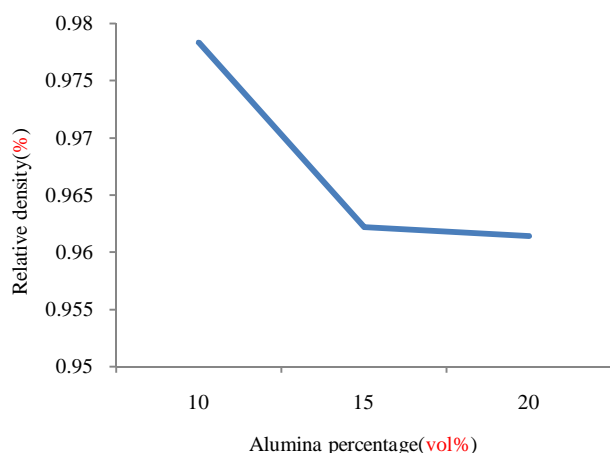


Fig. 6 Variation of the relative density of samples with different volume percentages of reinforcement at 400 MPa

شکل 6 تغییرات چگالی نسبی نمونه‌ها با درصد‌های حجمی متفاوت ذرات تقویت کننده در فشار ساخت 400 MPa

#### 4-2- فشرده‌سازی و تف‌جوشی نمونه‌ها

پس از فرایند چیدمان ذرات سرامیک  $Al_2O_3$  درزمینه‌ی فلزی Al بر پایه درجه‌بندی پیش‌بینی‌شده، نمونه‌های آماده‌شده در قالب با یک دستگاه پرس سرد تا فشارهای 200MPa، 400 و 500 MPa فشرده می‌شود.

در این تحقیق با توجه به پژوهش‌های پیشین رحیمیان و همکاران [33، 34] و محبوب و همکاران [35] پس از آزمایش‌های فراوان و با توجه به استحکام قابل قبول نمونه‌ها، لایه لایه نشدن و حفظ فرم استوانه‌ای، دمای 700 درجه سانتی‌گراد برای تف جوشی استفاده شد. نمونه‌ها برای فرایند تف جوشی در کوره به مدت یک ساعت از دمای محیط تا دمای 700 درجه سانتی‌گراد گرما دیده و تا یک ساعت در این دما نگهداری شدند و سپس تا دمای محیط سرد می‌شوند. در شکل 5 نمودار تف‌جوشی نمونه‌ها دیده می‌شود.

#### 5-2- آزمون‌های تعیین خواص

چگالی نمونه‌های بیرون آمده از کوره با روش ارشمیدس اندازه‌گیری شدند [36]. سپس، نمونه‌ها در راستای طولی استوانه برش داده شدند تا بتوان چینی و ریزساختار آلومینیوم و آلومینا در سطح مقطع طولی نمونه‌ها دیده شود. همچنین به منظور بررسی تغییرات چگالی لحظه‌ای یک نمونه 20 درصد آلومینا که با فشار 450 MPa فشرده شده بود به 4 بخش مساوی تقسیم شد و چگالی هر بخش از روش ارشمیدس اندازه‌گیری شد. از نمونه‌های ساخته‌شده تصاویر میکروسکوپ نوری (متالوگرافی) گرفته تا آرایش چیدمان آلومینا درزمینه‌ی آلومینیوم دیده و بررسی شود.

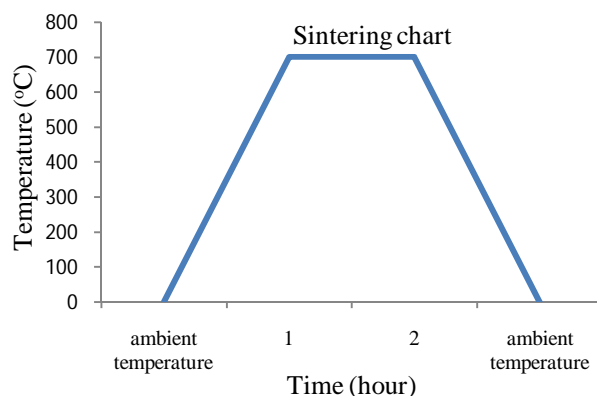


Fig. 5 Sintering diagrams in samples

شکل 5 نمودار تف جوشی در نمونه‌ها

همچنین به‌منظور اطمینان از عناصر سازنده ماده FGM یک

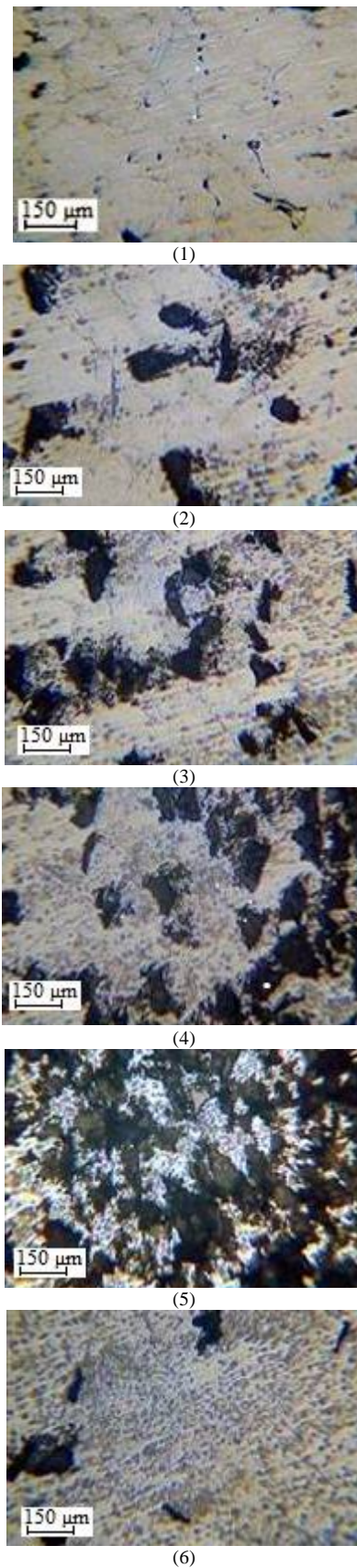


Fig. 9 A view of the cutaways along the sample of 10% alumina, 400 MPa

شکل 9 نمایی از برش‌هایی در طول نمونه 10 درصد آلومینای، 400 MPa

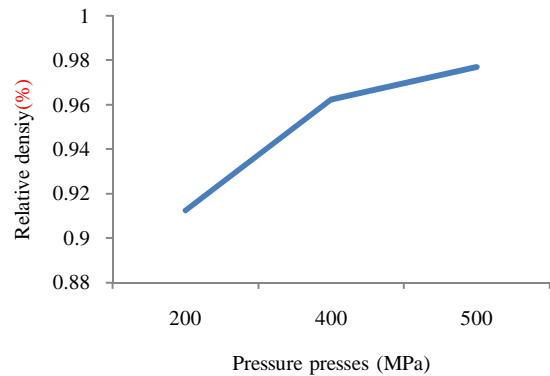


Fig. 7 Variation of the relative density of samples with different compaction pressures for 15% Alumina sample.

شکل 7 تغییرات چگالی نسبی نمونه‌ها با تغییر فشار تراکم برای نمونه 15 درصدی آلومینا

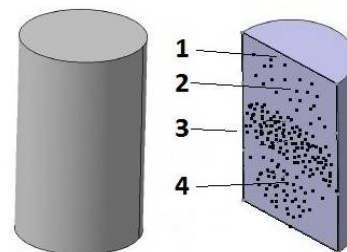
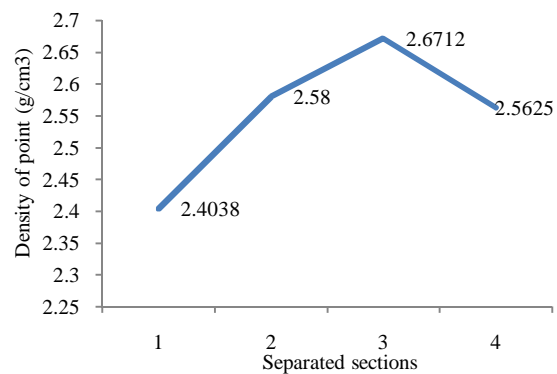


Fig. 8 Variation of density along the Al-20 vol% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sample (compaction pressure of 450 MPa)

شکل 8 تغییرات چگالی در طول یک نمونه 20 درصد آلومینا (فشار تراکم 450MPa)

### 2-3- مشاهدات ریزساختاری

در شکل 9 تصویر میکروسکوپی نمونه حاوی 10 درصد آلومینا با فشار تراکم 400 MPa نشان داده شده است. در این شکل، لکه‌های سیاه نشان دهنده ذرات آلومینا می‌باشد. نماهای مختلف این شکل به خوبی توزیع گرادایانی ذرات آلومینا را نشان می‌دهد. طول هر نما در این شکل نزدیک 1 mm است. ترتیب این نماها نشان می‌دهد بیشترین حجم آلومینا در میانه نمونه، و کمترین آن در ابتدای نمونه است، که با برآورد درجه‌بندی همخوانی دارد. در شکل 10 ریزساختار نمونه 10 درصد آلومینا با فشار ساخت 400 MPa نشان داده شده است.

در شکل 12 مانند شکل 9، نماهای تهیه شده که از سر نمونه (کمترین تراکم آلومینا) تا بخش‌های میانی (بیشترین حجم آلومینا) و در نهایت، به بخش پایانی (حجم آلومینا رو به کاهش) ادامه یافته است و نشانگر درستی درجه بندی مواد، مطابق پیش‌بینی این تحقیق است. نمای (3) در شکل 11 نشانگر بیشترین تراکم آلومینا در لایه میانی است، ترک‌هایی در همین لایه نمایان است، که می‌تواند به علت هم اندازه نبودن ذرات آلومینا، ذرات در میانه نمونه یا کیفیت پرس سرد باشد [33 و 34]. به منظور آنالیز عنصری بررسی عناصر تشکیل دهنده FGM و چیدمان آنها در راستای طولی نمونه، آنالیز عنصری بررسی عناصر تشکیل دهنده FGM و چیدمان آنها در راستای طولی نمونه انجام گرفت. در شکل 12 نمای SEM از یک ناحیه سطح نمونه (نمونه 15 درصد آلومینیوم، فشار تراکم 400 MPa) نشان داده شده که چند نقطه دور از هم برای بررسی نشانه‌گذاری شدند. نقاط و نواحی زرد رنگ نشان داده شده در شکل 12 بیانگر میزان بیشترین درصد عناصر در این بخش‌های انتخابی از نمونه هستند. در این بخش‌های زرد رنگ در شکل 12، به ترتیب آلومینیوم، اکسیژن و آهن بیشترین درصد عناصر موجود هستند. وجود آلومینیوم به عنوان زمینه مشخص است. وجود اکسیژن بیانگر فاز آلومینا است و آهن به عنوان بیشترین ناخالصی نمایش داده شده است.

در شکل 13 و جدول 2 آنالیز عنصری چهار نقطه‌ی برگزیده، به همراه نمودار و جداول درصد حجمی مواد اصلی آورده شده است. در این چهار نقطه از این سطح نشانه‌گذاری شده، تغییرات آلومینیوم و اکسیژن به‌وضوح نشان می‌دهد که ماده همگن نیست.

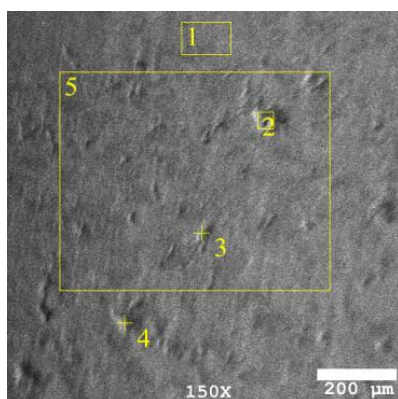


Fig. 12 A view of the selected section of the sample for elemental analysis, EDAX

شکل 12 نمایی از بخش گزینش شده از نمونه برای آنالیز عنصری، EDAX

تغییرات اکسیژن در نقاط گوناگون به خاطر وجود ریز ریز روزنه‌ها،

همان‌گونه که در این تصویر پیداست، کمترین تراکم ذرات آلومینا در ابتدا، بیشترین تراکم در میانه نمونه، و از میانه به سمت انتها از حجم آلومینا کاسته می‌شود، که هم‌راستا با درجه بندی (تابع گرادیان) برنامه ریزی شده است. برای دیدن، بهتر چیدمان ذرات آلومینا، با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی نماهایی تهیه شده است (شکل 11). در همه این شکل‌ها با نشان گذاری روی تصاویر ارتباط بین آنها مشخص شده است (با حروف A تا D لکه‌های آلومینا علامت گذاری شده است).

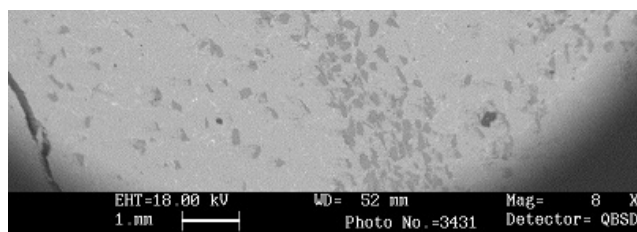


Fig. 10 SEM micrograph of the layout of alumina particles in Al- 10 vol% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Sample

شکل 10 نمای SEM چیدمان ذرات آلومینا در نمونه با 10 درصد آلومینا

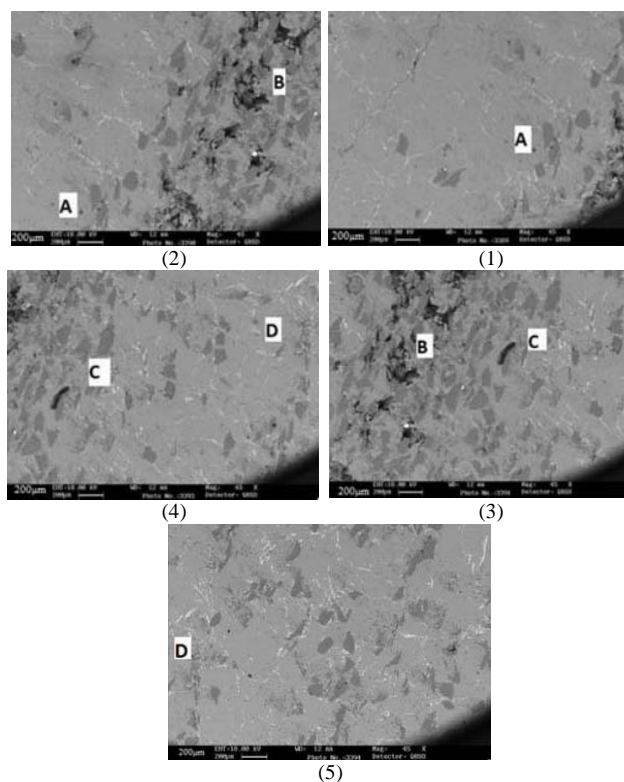


Fig. 11 SEM view 1, 2, 3, 4, 5, from parts of the head to the bottom of the sample (10% Alumina) with 45 X magnification. (Comment: The letters on the photos are added to show the relation of these five photos)

شکل 11 نماهای SEM 1 تا 5 از سر تا ته نمونه‌ای با 10 درصد آلومینا با بزرگنمایی 45X. (توضیح: حروف روی عکس‌ها جهت نشان دادن ارتباط این 5 عکس اضافه شده است).

ریزسختی و یکرز نمونه‌های تقویت شده با 10% و 15% آلومینا متراکم شده در فشار 400 MPa را نشان می‌دهد. در این دو نمودار، چیدمان نقاط سختی‌سنجی شده نشانگر تغییر درجه بندی آنها مطابق یک الگوی یکسان بود. اندازه عدد ریزسختی در این نمونه‌ها از ابتدا به سمت نقاط میانی با شیبی افزایشی روبرو است. پس از رسیدن به میانه نمونه، مقدار سختی اندازه‌گیری شده به بیشترین اندازه خود می‌رسد، که این الگوی ریزسختی نیز تقریباً منطبق بر درجه بندی در نظر گرفته شده می‌باشد. توجه شود که عامل تغییر سختی در بدنه نمونه‌ها آرایش و چیدمان ذرات آلومینا است.

فرورفتگی‌ها و بالآمدگی‌های ریزساختاری (تخلخل) درون نمونه است که سرچشمه گرفته از به‌کارگیری آلومیناست، پس می‌توان به‌درستی پذیرفت تغییرات اکسیژن در نمودارهای EDAX همان تغییرات درصد آلومینا در نقطه‌های گوناگون است. شکل 14 نیز به خوبی تغییرات عنصر اکسیژن را در طولی از نمونه نشان می‌دهد.

### 3-3- تغییرات ریز سختی

نمودار تغییرات ریزسختی ماده در طول نمونه استوانه‌ای می‌تواند به خوبی بیانگر چیدمان تابعی ذرات سرامیکی تقویت کننده باشد. شکل‌های 15 و 16 به طور نمونه تغییرات

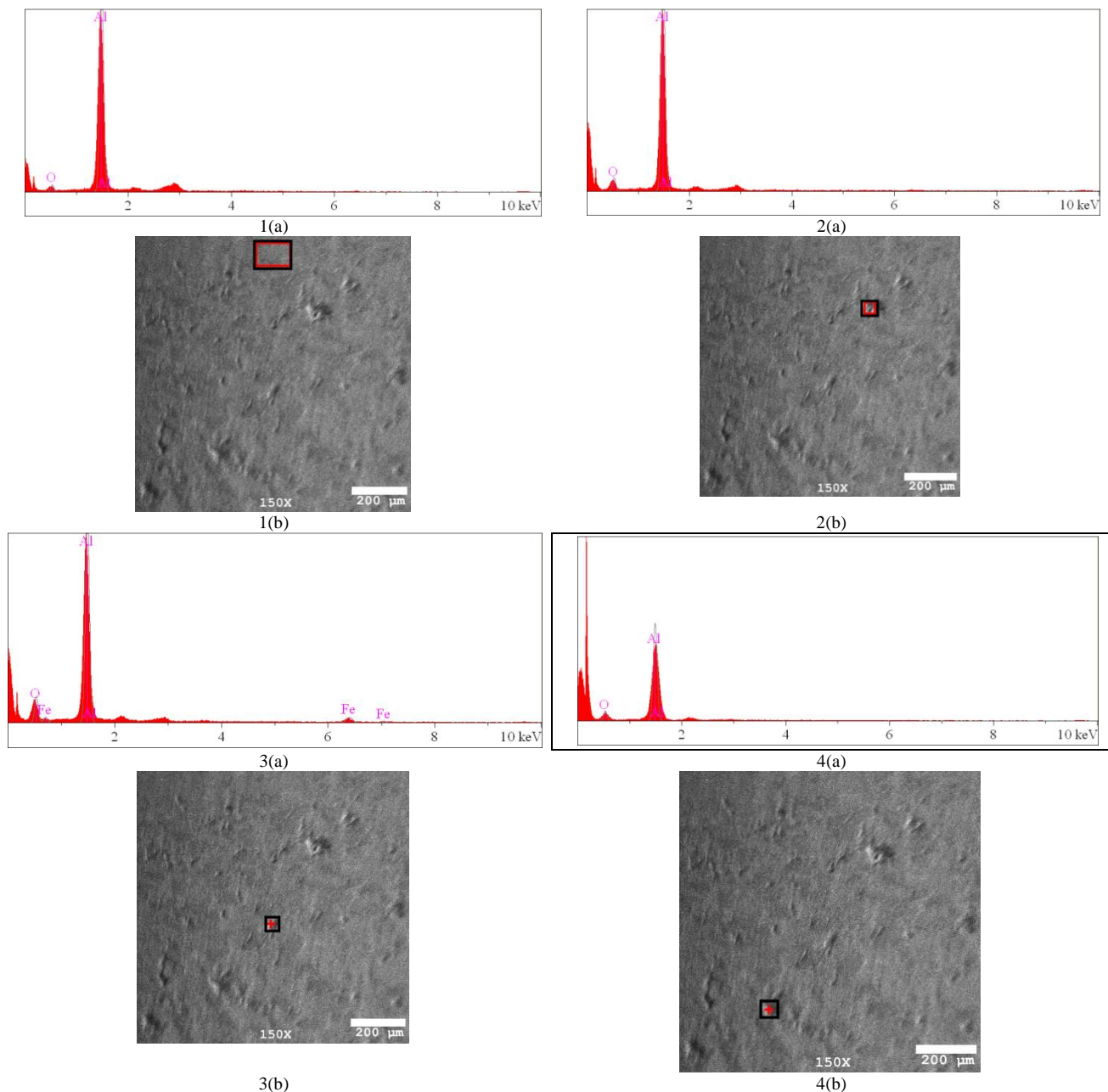


Fig. 13 (a) and (b): The graph of maker elements of in the points 1 to 4

شکل 13 نمودار آنالیز عناصر سازنده در نقطه‌های 1 تا 4



جدول 2 آنالیز عناصر سازنده در نقطه‌های (1) تا (4) شکل 13

Table 2 Analysis of the constructive elements at points (1) to (4) in Fig. 13

View No.	Element	Line	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units
1	O	Ka	84.71	84/71	21/40	13/90 wt.%
	Al	Ka	2,779.30	2779/30	78/60	86/10 wt.%
				100/00	100/00	wt.% Total
2	O	Ka	87.04	87/04	30/96	21/01 wt.%
	Al	Ka	1,554.59	1554/59	69/04	78/99 wt.%
				100/00	100/00	wt.% Total
3	O	Ka	148.07	148/07	38/50	25/99 wt.%
	Al	Ka	1,406.26	1406/26	58/22	66/29 wt.%
	Fe	Ka	58.32	58/32	3/28	7/72 wt.%
				100/00	100/00	wt.% Total
4	O	Ka	85.50	85/50	39/84	28/20 wt.%
	Al	Ka	923.78	923/78	60/16	71/80 wt.%
				100/00	100/00	wt.% Total

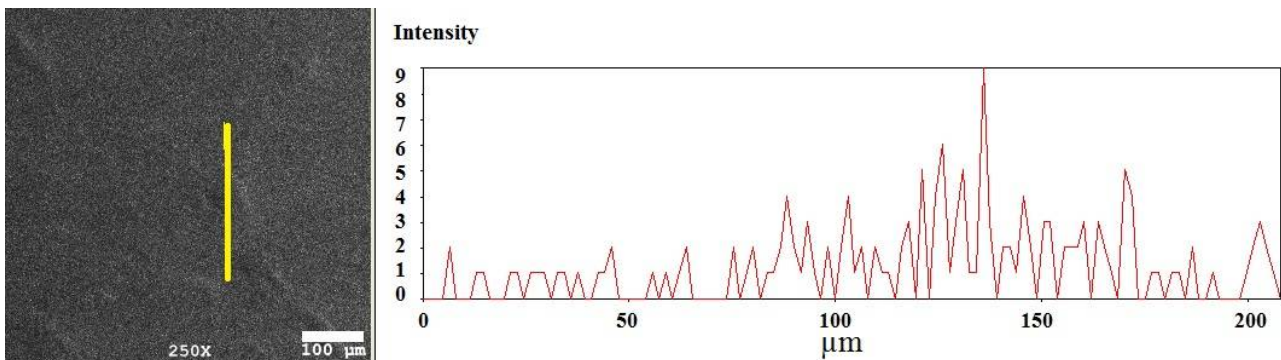


Fig. 14 Linear EDAX analysis of Oxygen element along the depicted path (on the left image)

شکل 14 آنالیز خطی EDAX عنصر اکسیژن در طول نشان داده شده از نمونه (تصویر سمت چپ)

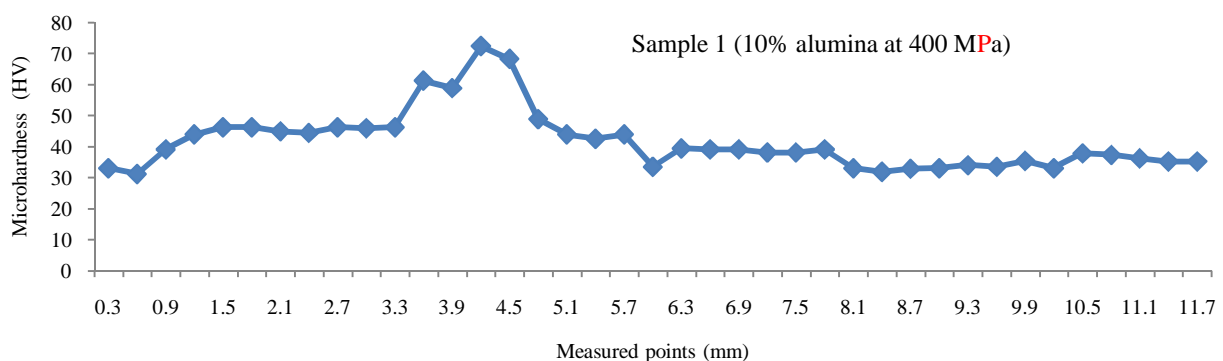


Fig. 15 Variation of micro-hardness along the cylindrical sample (Al-10 vol% alumina) under compacting pressure of 400 MPa

شکل 15 نمودار تغییرات میکروسختی نمونه تقویت شده با 10 درصد آلومینا تحت فشار تراکم 400 MPa

نتیجه نشانگر آن است که سختی با افزایش حجم آلومینا افزوده می‌شود. به طور کلی افزایش ذرات سرامیکی تقویت کننده به دلیل سختی ذاتی این ذرات و اثرات سخت شوندگی آنها موجب افزایش سختی ماده کامپوزیت می‌شود [37 و 38].

همان‌طور که در شکل‌های 15 و 16 مشخص است، بیشترین عدد سختی در نمونه 10 درصد آلومینا در حدود 70 HV است در حالی که بیشترین سختی در نمونه تقویت شده با 20% آلومینا تغییر زیادی داشته و تا حدود 110 HV پیش رفته است. این

Sample 3 (20% alumina at 400 MPa)

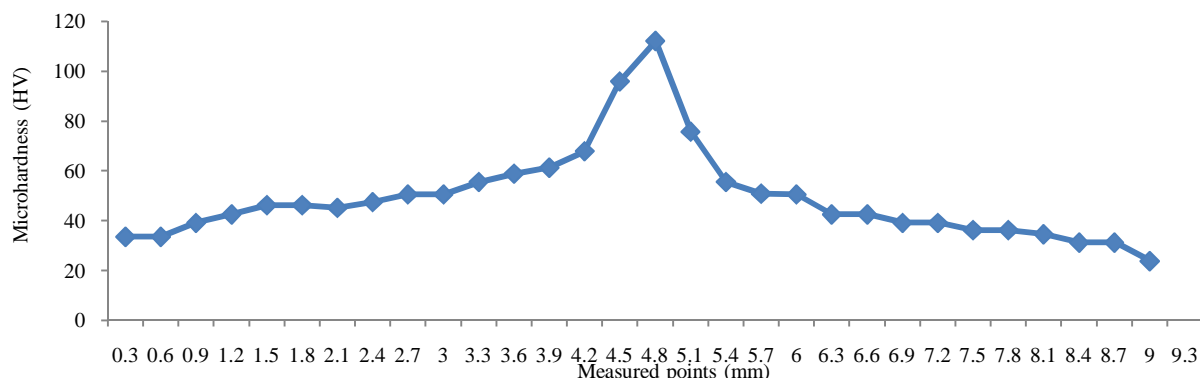


Fig. 16 Variation of micro-hardness along the cylindrical sample (Al-20 vol% alumina) under compacting pressure of 400 MPa

شکل 16 نمودار تغییرات میکروسختی نمونه تقویت شده با 20 درصد آلومینا تحت فشار تراکم 400 MPa

نمونه، به درصد ذرات آلومینا افزوده شد.

- با افزایش حجم ذرات آلومینا از 10 درصد به 20 درصد چگالی نسبی از 97/83% به 96/22% (کمتر از 2 درصد) کاهش می‌یابد و با افزایش فشار 200MPa به 500MPa چگالی نسبی از 91/25% به 97/70% (حدود 6 درصد) افزایش می‌یابد.

- با افزایش حجم ذرات سرامیک آلومینا از 10 درصد به 20 درصد، سختی حدود 70 درصد افزایش می‌یابد، ولی به همان نسبت هم احتمال وجود ترک‌ها افزوده می‌شود.

- با افزایش درصد حجمی به بالای 20 درصد، درجه بندی برنامه‌ریزی شده باعث افزایش حجم آلومینا در میانه قطعه شده و نمونه دچار ترک می‌شوند.

#### 5- مراجع

- [1] M.F.G.M. Koizumi, FGM activities in Japan, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 28, No. 1, pp. 1-4, 1997. DOI: 10.1016/S1359-8368(96)00016-9.
- [2] M. R. Hill, R. D. Carpenter, G. H. Paulino, Z. A. Munir, J.C. Gibeling, Fracture testing of a layered functionally graded material, *ASTM Special Technical Publications*, Vol. 1409, pp. 169-186, 2002. DOI: 10.1520/STP10478S.
- [3] F.H. Jones, Teeth and bones: applications of surface science to dental materials and related biomaterials, *Surface Science Reports*, Vol. 42, No. 3, pp. 75-205, 2001. DOI: 10.1016/S0167-5729(00)00011-X.
- [4] M. Mehrali, F.S. Shirazi, M. Mehrali, H.S.C. Metselaar, N.A.B. Kadri, N.A.A. Osman, Dental implants from functionally graded materials, *Journal of Biomedical Materials Research Part A*, Vol. 101, No. 10, pp. 3046-3057, 2013. DOI: 10.1002/jbm.a.34588.

تغییرات ناپیوسته و نوسانی در نمودارها به علت، هم‌سان نبودن ذرات آلومینا، در طول نمونه‌ها است، همچنین به علت ساختار ماده که از پودر ساخته شده است، در هنگام فشردن سازی ماده به صورت پیوسته فشار را انتقال نداده و در ابتدا و انتهای نمونه افزایش فشار وجود دارد در صورتی که ممکن است لایه‌های میانی‌تر از این فشار بهره کمتری ببرند [33-35].

#### 4- نتیجه‌گیری

با توجه به مباحث ارائه شده در این مقاله، نتایج زیر حاصل می‌شود:

- می‌توان با این روش از پودرهای فلز/سرامیک، نمونه‌های FGM فلز/سرامیک با درصدهای حجمی و اندازه ذرات متفاوت، با درجه بندی قابل پیش‌بینی از فازها ساخت.

- افزایش فشار تراکم از 200 تا 500 MPa موجب افزایش چگالی نسبی و پیوند ذرات گردید. این اتفاق به نوبه خود موجب افزایش استحکام نمونه و پیوند قوی‌تر لایه‌های FGM گردید.

- نمونه‌ها به دلیل ساختار پودری مواد سازنده FGM، انتقال فشار به همه بدنه ماده به صورت پیوسته انجام نمی‌گیرد. وجود حفره و مک در درون نمونه به خاطر عدم انتقال فشار به همه نمونه و نفوذ نکردن ذرات آلومینوم در بین ذرات آلومیناست.

- به دلیل دمای زیاد تف‌جوشی فاز آلومینا، امکان تف‌جوشی آن تحت دمای مورد استفاده در این تحقیق و رسیدن به لایه آلومینای خالص نبود و در نتیجه، در دو انتهای نمونه تنها فاز آلومینوم در نظر گرفته شد و با رفتن به سمت میان

- [16] F. Erdemir, A. Canakci, T. Varol, Microstructural characterization and mechanical properties of functionally graded Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiC composites prepared by powder metallurgy techniques, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 25, No. 11, pp. 3569-3577, 2015. DOI: 10.1016/S1003-6326(15)63996-6.
- [17] S.B. Li, J.X. Xie, Processing and microstructure of functionally graded W/Cu composites fabricated by multi-billet extrusion using mechanically alloyed powders, *Composites science and technology*, Vol. 66, No. 13, pp. 2329-2336, 2006. DOI: 10.1016/j.compscitech.2005.11.034.
- [18] A. Ruder, H.P. Buchkremer, H. Jansen, W. Mallener, D. Stöver, Wet powder spraying—a process for the production of coatings, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 53, No. 1-4, pp. 71-74, 1992. DOI: 10.1016/0257-8972(92)90105-J.
- [19] K. Prabhakaran, S. Raghunath, A. Melkeri, M.E. Jayasingh, C. Durgaprasad, N.M. Gokhale, Preparation of PZT Microtubes by Slip Casting on Vermicelli, Followed by In Situ Polymerization, *International Journal of Applied Ceramic Technology*, Vol. 7, No. 3, pp. 409-414, 2010. DOI: 10.1111/j.1744-7402.2009.02361.x.
- [20] A.P. Tomsia, E. Saiz, H. Ishibashi, M. Diaz, J. Requena, J.S. Moya, Powder processing of mullite/Mo functionally graded materials, *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 18, No. 9, pp. 1365-1371, 1998. DOI: 10.1016/S0955-2219(98)00066-1.
- [21] G.E. Knoppers, J. Dijkstra, W.P. van Vliet, The design of graded material objects, *TNO Science and Industry*, Netherlands, 2006.
- [22] K.F. Leong, C.M. Cheah, C.K. Chua, Solid freeform fabrication of three-dimensional scaffolds for engineering replacement tissues and organs, *Biomaterials*, Vol. 24, No. 13, pp. 2363-2378, 2003. DOI: 10.1016/S0142-9612(03)00030-9.
- [23] A. Tulp, W.S. Bont, An improved method for the separation of cells by sedimentation at unit gravity, *Analytical biochemistry*, Vol. 67, No. 1, pp. 11-21, 1975. DOI: 10.1016/0003-2697(75)90267-5.
- [24] S. Ocylok, A. Weisheit, I. Kelbassa, Functionally graded multi-layers by laser cladding for increased wear and corrosion protection, *Physics Procedia*, Vol. 5, pp. 359-367, 2010. DOI: 10.1016/j.phpro.2010.08.157.
- [25] A. Canakci, T. Varol, S.Özkaya, F. Erdemir, Microstructure and Properties of Al-B 4 C Functionally Graded Materials Produced by Powder Metallurgy Method, *Universal Journal of Materials Science*, Vol. 2, No. 5, pp. 90-95, 2014. DOI: 10.13189/ujms.2014.020502.
- [26] J. Stabik, A. Dybowska, M. Chomiak, Polymer [5] W. Pompe, H. Worch, M. Epple, W. Friess, M. Gelinsky, P. Greil, U. Hempel, D. Scharnweber, K. Schulte, Functionally graded materials for biomedical applications, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 362, No. 1-2, pp. 40-60, 2003. DOI: 10.1016/S0921-5093(03)00580-X.
- [6] M. H. Elahinia, M. Hashemi, M. Tabesh, S. B. Bhaduri, Manufacturing and processing of NiTi implants: a review, *Progress in Materials Science*, Vol. 57, No. 5, pp. 911-946, 2012. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2011.11.001.
- [7] T. Li, Y. H. Chen, J. Ma, Characterization of FGM monomorph actuators fabricated using EPD, *Journal of materials science*, Vol. 40, No. 14, pp. 3601-3605, 2005. DOI: 10.1007/s10853-005-0643-6.
- [8] V. Birman, Larry W. Byrd, Modeling and Analysis of Functionally Graded Materials and Structures, *In Encyclopedia of Thermal Stresses*, pp. 3104-3112, Springer Netherlands, 2014.
- [9] B. Kieback, A. Neubrand, H. Riedel, Processing techniques for functionally graded materials, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 362, No. 1-2, pp. 81-106, 2003. DOI: 10.1016/S0921-5093(03)00578-1.
- [10] J. Zhu, Z. Lai, Z. Yin, J. Jeon, S. Lee, Fabrication of ZrO<sub>2</sub>-NiCr functionally graded material by powder metallurgy, *Materials chemistry and physics*, Vol. 68, No. 1-3, pp. 130-135, 2001. DOI: 10.1016/S0254-0584(00)00355-2.
- [11] O. Gillia, B. Caillens, Fabrication of a material with composition gradient for metal/ ceramic assembly, *Powder technology*, Vol. 208, No. 2, pp. 355-366, 2011. DOI: 10.1016/j.powtec.2010.08.029.
- [12] V. Bhavar, P. Kattire, S. Thakare, S. Patil, R. Singh, A Review on Functionally Gradient Materials (FGMs) and Their Applications, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 229, p. 012021, 2017. DOI: 10.1088/1757-899X/229/1/012021
- [13] G. Udupa, S.S. Rao, K.V. Gangadharan, Functionally graded composite materials: an overview, *Procedia Materials Science*, Vol. 5, pp. 1291-1299, 2014. DOI: 10.1016/j.mspro.2014.07.442.
- [14] M. Joansson, B. Kieback, W-Cu Gradient Materials –Processing, Properties and Application Possibilities, *Proceedings of The 15th International Plansee Seminar*, Vol. 1, pp. 1-15, 2001.
- [15] Y. Iwai, T. Honda, T. Miyajima, Y. Iwasaki, M.K. Surappa, J.F. Xu, Dry sliding wear behavior of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> fiber reinforced aluminum composites, *Composites science and technology*, Vol. 60, No. 9, pp. 1781-1789, 2000. DOI: 10.1016/S0266-3538(00)00068-3.

- International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, Vol. 5, No. 1, pp.622-629,2012. DOI: 10.15282/ijame.5.2012.8.0049
- [33] M. Rahimian, N. Parvin, N. Ehsani, The effect of production parameters on microstructure and wear resistance of powder metallurgy Al–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite, *Materials & Design*, Vol. 32, No. 2, pp. 1031-1038, 2011. DOI: 10.1016/j.matdes.2010.07.016.
- [34] M. Rahimian, N. Ehsani, N. Parvin, H. R. Baharvandi, The effect of particle size, sintering temperature and sintering time on the properties of Al–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composites, made by powder metallurgy, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, No. 14, pp. 5387-5393, 2009. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2009.04.007.
- [35] H. mahboob, S.A. Sajjadi, S.M. Zebarjad, Synthesis of Al–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanocomposite by ball milling method and evaluation of effective parameters on the mechanical properties, *International Conference on MEMS and Nanotechnology (ICMN '08)*, Kuala Lumpur, Malaysia, 13-15 May, 2008.
- [36] ASTM C 373-72, *Water absorption, bulk density, apparent porosity and apparent specific gravity of fired whit-ware products*, re-approved 1977
- [37] A. Atrian, G.H. Majzoobi a, M.H. Enayati b, H. Bakhtiari, A comparative study on hot dynamic compaction and quasi-static hot pressing of Al7075/SiCnp nanocomposite, *Advanced Powder Technology*, Vol. 26, No. 1, pp. 73–82, 2015. DOI: 10.1016/j.appt.2014.08.007
- [38] A. Atrian, S. H. Nourbakhsh, Mechanical Behavior of Al-SiCnp Nanocomposite Fabricated by Hot Extrusion Technique, *International Journal of Advanced Design and Manufacturing Technology*, Vol. 11, No. 1, pp. 33-41, 2018.
- composites filled with powders as polymer graded materials, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, Vol. 43, No. 1, pp. 153-161, 2010.
- [27] K. Nishiyabu, S. Matsuzaki, S. Tanaka, Fabrication and mechanical properties of functionally graded micro porous metals by MIM-base powder space holder method, *In Sandwich Structures 7: Advancing with Sandwich Structures and Materials*, pp. 733-742, Springer Netherlands, 2005. DOI: 10.1007/1-4020-3848-8\_74.
- [28] T. Li, Q. Li, J.Y.H. Fuh, P.C. Yu, L. Lu., Two-material powder injection molding of functionally graded WC–Co components, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, Vol. 27, No. 1, pp. 95-100, 2009. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2008.04.005.
- [29] K. Gupta, H. Saini, M. Asghar Zaidi, Synthesis of Functionally Graded Material by Powder Metallurgy, *Journal of Material Science and Mechanical Engineering (JMSME)*, Vol. 4, No. 3, pp. 163-165, 2017.
- [30] A. Canakci, T. Varol, S. Özkaya, F. Erdemir, Microstructure and Properties of Al-B4C Functionally Graded Materials Produced by Powder Metallurgy Method, *Universal Journal of Materials Science*, Vol. 2, No. 5, pp. 90-95,2014. DOI: 10.13189/ujms.2014.020502
- [31] M. I. A. Latiff, D. M. Nuruzzaman, S. Basri, N. M. Ismail, S. N. S. Jamaludin, F. F. Kamaruzaman Preparation and characterization of 6-layered functionally graded nickel-alumina (Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) composites, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 342, p. 012063, 2018. DOI: 10.1088/1757-899X/342/1/012063
- [32] A. Sanuddin, Aidy Ali, M. A. Azmah Hanim, Fabrication of Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> FGM rotating disc,