



تولید ماده تابعی لایه‌ای نیکل - مس به روش متالورژی پودر و بررسی خواص آن

علی شقاقی مقدم - استادیار گروه طراحی کاربردی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد واحد تاکستان
محمد مهدی علیجانی و آرشد محمدیان - دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد واحد تاکستان

E-mail: Shaghghi@ioec.com

چکیده: هدف از این تحقیق ساخت ماده تابعی نیکل - مس به روش متالورژی پودر می‌باشد. برای این منظور از روش زینترینگ بدون فشار استفاده شده است. در این پژوهش ماده تابعی بصورت لایه‌ای در نظر گرفته شده است که با تزریق تک تک لایه‌ها در قالب، عملیات فشرده‌سازی صورت گرفته و در نهایت ماده خام فشرده شده داخل کوره حرارتی قرار داده می‌شود. بعد از پخت نمونه‌ها در کوره، آنالیزهای مختلفی برای بررسی خواص ماده تابعی انجام شده است. درصد تخلخل در نمونه‌ها توسط روش غوطه‌وری محاسبه شده است. برای آنالیز متالورژی مواد تابعی ساخته شده، از میکروسکوپ الکترونیکی استفاده شده است. برای تعیین گرادین ماده تابعی لایه‌ای از آزمایش ایدکس استفاده شده است. در نهایت از تست سختی برای بررسی مقاومت به نفوذ ماده در دو سمت نیکل و مس استفاده شده است. با ساخت نمونه‌های مختلف ماده تابعی مشاهده گردید که بعد از پخت نمونه‌ها و سرد شدن قطعه، اعوجاج در نمونه نهایی ایجاد خواهد شد که علت این اعوجاج اختلاف ضریب نرخ انقباض و همچنین ضریب انبساط حرارتی نیکل و مس می‌باشد.

واژه های کلیدی: ماده تابعی لایه ای، نیکل-مس، زینترینگ بدون فشار، تخلخل، سختی.

Fabrication of layered Nickel-Copper functionally graded material by powder metallurgy Method

A. Shaghghi Moghaddam, Ass. Prof., the Faculty of Mech. Eng., TIAU

M. Mahdi Alijani and A. Mohammadian. M. S. Student, the Faculty of Mech. Eng., TIAU

Abstract: In the present work Nickel-Copper graded material is fabricated by using powder metallurgy method. To this aim pressure less sintering has been used. Gradation architecture is assumed to be layer-wise, where the layer thickness and number of layers are fabrication parameters. Then the powders are mixed in a rotating instrument. In the next step the powders are injected in the die and then compacted to the predefined pressure. Vacuum oven is used for sintering the powders and argon gas to protect powders from oxidation. Due to mismatch in mechanical and thermal material properties of constituents, some modes of failures occurred during fabrication. Typically due to mismatch in sintering rate of material constituents, non uniform shrinkage takes place. Upon completion of sintering stage, the material is cooled down. During the cooling stage distortion takes place due to mismatch between coefficient of thermal expansion of nickel and copper. Interpretation of experimental results is supported by means SEM and EDX. Material gradation is observed through SEM and by means of EDX analysis the volume fraction of material constituents are obtained through thickness. Hardness test has been conducted to investigate the hardness value on the nickel and copper sides of the graded materials.

Keywords: Functionally graded material, Nickel-Copper, Pressure less sintering, SEM, EDX

۱- مقدمه

تابعی دو نوع ساختار گرادایانی وجود دارد: گرادایان پیوسته و گرادایان پله‌ای. در حالت پیوسته ترکیب و ریزساختار به صورت پیوسته از نقطه‌ای به نقطه دیگر تغییر می‌نماید. در این روش تغییر خواص در ماده به صورت پیوسته می‌باشد. از سوی دیگر در حالت پله‌ای تغییر ویژگی‌های در ریزساختار به نحوی است که ساختار لایه‌ای ایجاد می‌شود. در این حالت فصل مشترک بین لایه‌ها به صورت گسسته می‌باشد. با افزایش تعداد لایه‌ها و کم کردن ضخامت هر یک از آن‌ها، می‌توان گرادایان را به ساختار پیوسته نزدیک‌تر نمود. بدین ترتیب از تغییر ناگهانی خواص و ایجاد ترک بین لایه‌ها ممانعت به عمل می‌آید. مواد تابعی به طور کلی به دو صورت حجمی و پوششی مورد استفاده قرار می‌گیرند. تا به امروز روش‌های زیادی برای ساخت مواد تابعی حجمی پیشنهاد شده است. می‌توان این روش‌ها را به دو گروه اصلی تقسیم‌بندی نمود. روش‌هایی که وابسته به فرایندهای پودری می‌باشند و روش‌هایی که در آن‌ها فرایندهای ریخته‌گری مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این بین انتخاب روش مناسب با توجه به ساختار طراحی شده برای دستیابی به هدف کاربردی مورد نظر از اهمیت بالایی برخوردار است.

راجان و همکاران [۳] ساخت کامپوزیت های ماتریس فلزی تابعی به روش سانتریفوژ افقی، در حالت سه بعدی را مورد بررسی قرار داده‌اند. ماده به کار رفته کامپوزیت کاربردی آلومینیوم-سیلیکون می‌باشد که در آن از مذاب های همگن حاوی آلیاژهای آلومینیوم ۳۵۶ و ۲۱۲۴ و ذرات تقویتی کاربرد سیلیسیوم استفاده شده است. این مواد در تهیه اجزای مهندسی ای که نیازمند سختی سطحی و مقاومت سایشی بالا هستند، کاربرد دارند. حداد و همکاران [۴] ساخت ماده تابعی به روش سانتریفوژ مخلوط پودر در حالت سه بعدی را بررسی نمودند. ماده به کار رفته آلیاژ آلومینیوم تقویت شده با ذرات تقویتی بین فلزی آلومینید می‌باشد. همچنین به تشریح مزایای استفاده از

مواد تابعی اختلاطی پیوسته از دو ماده مختلف می‌باشند. تغییرات خواص این گونه مواد با تغییر نسبت حجمی دو ماده تشکیل دهنده در هر نقطه بدست می‌آید. مواد تابعی بدلیل داشتن مزیت‌های مختلف از جمله توزیع بهتر تنش‌های باقیمانده، خواص حرارتی بهبودیافته و چقرمگی بهتر کاربردهای مختلفی را در صنایع مختلف پیدا کرده‌اند. دانشمندان در سال ۱۹۸۴ در منطقه سندایی ژاپن برای اولین بار ماده تابعی را به عنوان ماده‌ای با مقاومت حرارتی و مکانیکی بالا جهت ساخت بنده شاتل پیشنهاد نمودند. برای ساخت سطح بیرونی شاتل به دنبال ماده‌ای بودند که مقاومت حرارتی بالایی داشته باشد و در برابر اختلاف دمای شدید هنگام ورود و خروج از جو نیز مقاوم باشد. از آنجایی که هیچ ماده خالص و یا آلیاژی در طبیعت وجود نداشت که علاوه بر خواص مکانیکی مناسب بتواند در مقابل دماهای بالا نیز مقاومت داشته باشد، ایده تغییر تدریجی مواد در ریز ساختارها ارائه شد [۱]. مواد تابعی اغلب به صورت ترکیب پیوسته‌ای از فازهای فلز و سرامیک، فلز و فلز، پلیمر و سرامیک، پلیمر و فلز، سرامیک و سرامیک مورد استفاده قرار می‌گیرند. در مواد تابعی فلز-سرامیکی، مؤلفه سرامیکی باعث ایجاد خواص منحصر به فردی همچون مقاومت حرارتی، مقاومت به خوردگی و مقاومت سایشی در ماده تابعی می‌شود. از سویی دیگر مؤلفه فلزی نیز باعث انعطاف پذیری ماده تابعی شده و از رشد ترک و شکست ماده در اثر تنش‌های حرارتی بسیار بالا جلوگیری می‌نماید. [۲]. برای دستیابی به ماده تابعی روش‌های مختلفی را می‌توان مورد استفاده قرار داد. این روش‌ها با توجه به نوع ساختار و گرادایان مورد نظر، نوع ترکیب و خواص مواد تشکیل دهنده‌ی ماده تابعی انتخاب می‌شوند. مهم‌ترین این خواص عبارتند از: دمای ذوب، مقاومت حرارتی و ضریب انبساط حرارتی مواد تشکیل دهنده ماده تابعی و همچنین نوع گرادایان و ضخامت لایه‌ها. به طور کلی می‌توان گفت برای ساخت مواد

نیکل-آلومینا با پوشش فولاد نرم که دارای مقاومت بسیار عالی در برابر خوردگی و اکسایش می‌باشد و دارای چقرمگی قابل توجهی است. توکیتا [۸] شیوه عملکرد دستگاه زینترینگ پلاسمای جرقه ای را بیان نموده است. همچنین سیستم های زینترینگ پلاسمای جرقه قانون های حاکم بر این روش و ویژگی های آن همراه با مثال های کاربردی بیان شده است. قافیل [۹] تکنیکی برای ساخت ماده تابعی نیکل- مس با استفاده از متالورژی پودر ارائه نمود که در آن از روش زینترینگ بدون فشار استفاده شده است. در ادامه تأثیر پارامترهای زینترینگ مانند دما، زمان نگهداری در دمای مربوطه و فشار پرس بر ماده تابعی ساخته شده مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین ماده تابعی ساخته شده دارای ساختار پله ای بوده است. زو و همکاران [۱۰] ساخت ماده تابعی به روش متالورژی پودر را مورد بررسی قرار دادند. ابتدا پودرها با کسر حجمی های مختلف با هم مخلوط شده و سپس به بررسی فرایند زینترینگ آن ها پرداخته شده است و بدین ترتیب به تعیین روش ساخت مناسب برای این ماده تابعی پرداخته شده است. پس از تحلیل میکروسکوپی ماده تابعی ساخته شده، مشاهده شده است که ترکیب شیمیایی و ریز ساختار این ماده به صورت گرادینانی و پله ای تغییر نموده است. بدین ترتیب مشکل لایه لایه شدن در سطح مشترک فلز و سرامیک مرتفع شده است. پینس و بروک [۱۱] ماده تابعی نیکل- آلومینا با استفاده از روش متالورژی پودر تحت زینترینگ بدون فشار را ساختند. در ادامه تفاوت های موجود میان انقباض حرارتی پودرهای فلزی و سرامیکی و همچنین تأثیر شرایط زینترینگ بر رشد ترک و تنش های ایجاد شده بیان شده است. سپس در معرفی پروسه ساخت با تغییر درصد های اختلاط دو فاز نیکل و آلومینا، گرادینا بهینه به دست آمده است. سوگکین و همکاران [۱۲] با پیش بینی انقباض حین فرایند زینترینگ به صورت تجربی، ساخت ماده تابعی نیکل- آلومینا را بررسی نمودند. ابتدا نمونه ها با

تیتانیوم نسبت به سایر تقویت کننده ها از جمله ضریب پخش و قابلیت انحلال کم در آلومینیوم، دمای ذوب مناسب، چگالی پایین و نرخ زمخت شدگی کم در دماهای بالا، نیز پرداخته شده است. روبریو و پائولینو [۵] تحلیل عددی و تجربی ساختارهای تابعی را بررسی نمودند. مواد به کار رفته نیکل و مس بوده اند. برای مدلسازی از کدنویسی المان محدود در مطلب استفاده شده است که امکان شبیه سازی ساختارهای تابعی را به کمک تحلیل هارمونیک و با استفاده از فرمول بندی المان محدود فراهم آورده است. همچنین برای تحلیل تجربی ساختارهای نیکل- مس از زینترینگ پلاسمای جرقه ای کمک گرفته شده است. سختی و مدول یانگ ساختارهای تابعی به ترتیب با استفاده از اندازه گیری های اولتراسونیک محاسبه شده است. گرادیان موثر نیکل- مس نیز توسط دستگاه های میکروسکوپ نوری، طیف سنج تجزیه انرژی و تست سختی نمایان شده است. در پایان به مقایسه مقادیر و نمودارهای به دست آمده پرداخته شده است. واتانبه و همکاران [۶] روش دوغابی و انواع ذرات استفاده شده در آن را آنالیز نموده اند با استفاده از این روش می‌توان دشواری دستیابی به گرادینا پیوسته در روش متالورژی پودر را مرتفع نموده و مواد تابعی را با گرادینان های پیوسته تولید نمود. در ادامه نمودار سرعت ذرات زیرکونیا و تیتانیوم با توجه به سایز و چگالی آن ها ارائه شده و حالات مختلف آن مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین روش پیشرفته تری به نام روش ریزشی دوغابی پیشنهاد شده است که در آن وجود ناحیه حلال باعث افزایش زمان ته نشینی شده و امکان دستیابی به گرادینان های ترکیبی بزرگتر را فراهم می‌آورد. واتانبه و همکاران [۷] روش سانتیفریژ واکنشی را مورد استفاده قرار داده که شامل یک واکنش گرمازا میان مایع های عنصری بوده و زمینه لازم را برای تهیه مایع از یک ترکیب بین فلزی دارای نقطه ذوب بالا، بدون نیاز به گرمایش خارجی فراهم می‌آورد. در ادامه ترکیبی از ریخته گری واکنشی و سانتیفریژ برای ساخت لوله ای از جنس

درصد‌های حجمی متفاوت مربوط به هر لایه در شرایط مختلفی زینتر شده است. سپس با اندازه گیری و مقایسه دانسیته قطعات قبل (جسم خام اولیه) و بعد از زینترینگ فرمول بندی تجربی ای برای پیش بینی انقباض و ارتباط آن با درصد حجمی پودر به دست آمده است و بدین ترتیب سعی بر کاهش تخلخل حین فرایند زینترینگ شده است. همچنین نتیجه گیری شده است که با بهینه سازی این فرمول بندی می توان به ساختاری دست یافت که مقدار انقباض و ترک های داخلی در آن به حداقل رسیده باشد. ان و ولوگ [۱۳] به معرفی مواد تابعی سرامیکی و چگونگی تهیه آن ها برای مصارف خاص پرداخته شده است و مزایای آن ها از جمله کنترل تغییرات در خواص حرارتی، ساختاری و تابعی بیان شده است. طبقه بندی کامپوزیت های سرامیکی آورده شده است تا بتوان در انتخاب بهترین فرایند برای دستیابی به کاربرد مورد نظر به موفقیت دست یافت. در پایان به مزایای این ترکیبات تابعی در محدود نمودن تنش های سطحی باقی مانده و مقاومت سایشی اشاره شده است. پینس [۱۴] با استفاده از روش زینترینگ بدون فشار ورق تابعی فلز-سرامیک را تولید نمود. شقاقی و همکاران [۱۵] ماده تابعی نیکل-آلومینا را به روش زینترینگ بدون فشار ساختند. در این تحقیق اثرات سیکل حرارتی و فشار پرس در رفتار ماده تابعی مورد بررسی قرار گرفت. آنها برای بررسی نتایج تجربی از روش المان محدود استفاده نمودند. برای این منظور از نرم افزار آباکوس استفاده کرده و به کمک سابروتین ماده، آنالیز مربوطه را انجام دادند. حل عددی ماده تابعی در تحقیقات زیادی مانند [۱۶-۲۰] انجام شده است.

ماده تابعی نیکل-مس دارای خواص مکانیکی و حرارتی گسترده‌ای بوده و در صنایع دریایی و معدنی دارای طیف کاربردی زیادی می‌باشد. به علت مقاومت بالای این ماده نسبت به خوردگی در مقابل آب در کشتی سازی از آن استفاده می‌شود.

همچنین مقاومت بالای آن نسبت به چسبندگی رسوب‌های طبیعی در آب باعث شده است تا در ساخت تجهیزات دریایی و آب شیرین‌کن‌ها نیز مورد استفاده قرار گیرد. در صنایع معدنی و ساخت ابزارآلات معدن‌کاری موادی که از مقاومت سایشی و مقاومت تسلیم بالایی برخوردار باشند همواره مورد توجه واقع می‌شوند. با استفاده از ماده تابعی نیکل-مس می‌توان مواد با خواص فوق را بدون جوشکاری در کنار هم قرار داد و بدین ترتیب استحکام لازم برای ابزارآلات معدن‌کاری را فراهم نمود. پس از بررسی‌های فراوان صورت پذیرفته در زمینه روش‌های ساخت مواد تابعی حجمی و با توجه به دسترسی به امکانات موجود در مراکز علمی و صنعتی کشورمان، روش متالورژی پودر برای ساخت ماده تابعی نیکل-مس مورد استفاده قرار گرفته است. این روش دارای مزیت‌های فراوان مانند کنترل پذیری بالا در ریزساختارها، صرفه اقتصادی و همچنین امکان ترکیب مواد با خواص مختلف می باشد. در این تحقیق اقدام به ساخت ماده تابعی لایه ای با استفاده از روش متالورژی پودر شده و تأثیر پارامترهای مؤثر بر ساخت نظیر دما، فشار و زمان بر خواص قطعه نهایی مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور تحلیل نمونه‌های ساخته شده از آزمایش تخلخل، عکس‌برداری با میکروسکوپ الکترونی روبشی و تست سختی استفاده شده است [۱].

۲- شرح مساله

همانطور که گفته شد ماده تابعی نیکل-مس دارای کاربردهای مختلفی در صنایع دریایی و معدنی می باشد به همین دلیل در این پژوهش اقدام به ساخت آن شده است. فلز نیکل علی‌رغم اینکه سختی پایینی دارد، ولی از رسانایی و قابلیت جوش‌کاری بالایی برخوردار است. همچنین مس و آلیاژهای آن عموماً دارای رسانایی حرارتی و الکتریکی خوبی می‌باشند و از مقاومت به خوردگی بالایی نیز برخوردارند. خواص مکانیکی و حرارتی نیکل و مس در جدول ۱ نشان داده شده است.

خواص ویژه‌ای از ماده مورد انتظار است، ریزساختارها نقشی اساسی در انتخاب نوع پودر ایفا می‌کنند. در ساخت ماده تابعی نیکل-مس، برای لایه‌های سطوح بالایی و پایینی که از جنس نیکل خالص و مس خالص می‌باشند از ذرات ریزتر استفاده شده است. علاوه بر این، هرچه از سطح نیکل خالص به سمت لایه-های میانی پیشروی شده است، ذرات نیکل بزرگتر مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این امر باعث نفوذ بهتر ذرات در یکدیگر می‌شود [۱۵]. پس از تعیین سایز ذرات مورد استفاده برای هر لایه، باید مقدار پودر مورد نظر برای آن لایه را نیز محاسبه نمود. با توجه به اینکه محاسبه حجم پودر مورد نیاز برای هر لایه با دشواری-هایی رو به رو است، با تبدیل کسر حجمی به مقادیر وزنی، می‌توان مقادیر مورد نیاز از هر ماده را برای لایه‌های مختلف محاسبه نمود. در این پژوهش وزن کل هر لایه ثابت در نظر گرفته شده است. سپس با توجه به درصد حجمی نیکل و مس در هر لایه می‌توان مقدار وزن نیکل و وزن مس را در آن لایه محاسبه نمود. با توجه به چگالی مس و نیکل و همچنین درصد حجمی دو ماده در هر لایه می‌توان چگالی متوسط را در هر لایه از قانون مخلوط‌ها محاسبه نمود. جدول ۲ سایز و مقدار ذرات مورد استفاده برای هر لایه در ساخت یکی از نمونه‌های یازده لایه‌ای ماده تابعی نیکل-مس به روش متالورژی پودر را نشان می‌دهد. همچنین برای ساخت نمونه نیکل-مس شش لایه‌ای از اندازه و مقادیر جدول ۳ برای لایه‌های مختلف استفاده شده است. پس از اندازه‌گیری وزن پودرهای مورد نیاز برای هر لایه بر اساس کسر حجمی از پیش طراحی شده، پودرها باید به طور همگن با یکدیگر مخلوط شوند. این امر به منظور توزیع همگن خواص و پراکندگی یکنواخت ذرات تقویتی در هر لایه صورت می‌پذیرد. در متالورژی پودر برای مخلوط سازی پودرها از مخلوط‌کن‌هایی چون درام، دو مخروطی، ریبون، مولر، ماریچ عمودی و آسیاب سیاره‌ای استفاده می‌شود. به دلیل حجم کم پودرهای مورد استفاده و همچنین تعداد نسبتاً زیاد لایه‌ها در

همانگونه که اشاره شد، هدف از ساخت ماده تابعی دستیابی به ماده‌ای با خصوصیتی مختلف از مواد تشکیل‌دهنده به طور هم‌زمان می‌باشد. بنابراین هنگام انتخاب روش مناسب برای ساخت ماده تابعی، باید اختلاف میان خواص دو فاز تشکیل‌دهنده آن را مد نظر قرار داد. با توجه به مزیت‌های فراوان متالورژی پودر مانند کنترل پذیری بالا در ریزساختارها، صرفه اقتصادی و همچنین امکان ترکیب مواد با خواص مختلف در این روش، در این پژوهش از روش متالورژی پودر استفاده شده است. پس از کسب اطلاعات مورد نیاز و انتخاب پودرهای مناسب، پودرهای نیکل و مس در سایزهای مورد نظر از بازار تهیه شده است. همچنین با طراحی و ساخت چندین نمونه قالب سعی در ارتقای کار بوده و موانع موجود در پرس نمودن نمونه-ها با صرف زمان و هزینه زیاد مرتفع شده است. در ادامه مراحل مورد استفاده در روش متالورژی پودر برای ساخت ماده تابعی نیکل-مس بیان شده است. در گام نخست به انتخاب پودر و آماده‌سازی آن پرداخته شده و سپس نمونه‌ها در شکل‌های مختلف تهیه شده است. در ادامه با ایجاد گرادیان‌های لایه‌ای متفاوت و تغییر پارامترهای مؤثر بر ساخت نظیر دما، فشار و زمان به بررسی تأثیر هر یک از این پارامترها بر خواص قطعه نهایی پرداخته شده است.

۳- روش حل

جهت ساخت ماده تابعی به روش متالورژی پودر، انتخاب مناسب پودر از جهت دانه بندی و خلوص حائز اهمیت می‌باشد. همچنین باید در نظر داشت که ایجاد پودری همگن در لایه‌ها و در بعضی مواقع افزودن ماده هم‌گیر یا روان‌ساز جهت ساخت این ماده الزامی است [۱۵]. برای تهیه مخلوط پودر هر لایه، نوع، دانه بندی و درصد اختلاط مواد تشکیل‌دهنده باید به گونه‌ای انتخاب شود که علاوه بر ایجاد گرادیان مورد نظر، توزیع همگن در هر لایه نیز مد نظر قرار گیرد. هنگامی که

بر این به دلیل قابل تنظیم بودن سرعت روتور و قابلیت نصب تعداد بیشتری از ظروف بر روی آن، با این روش می‌توان زمان مخلوط سازی را نیز کاهش داد. در فرایندهای متالورژی پودر، به علت سطح تماس زیاد میان پودرهای ریزدانه پدیده کلوخه شدن رخ می‌دهد. پس از فرایند مخلوط سازی، محتوی ظرف داخل یک الک با مش ۱۵۰ میکرومتر ریخته می‌شود تا علاوه بر جداسازی ساچمه‌ها از پودر، از کلوخه شدن پودرها حین تزریق در قالب نیز ممانعت به عمل آید. به منظور فشردن پودرهای آماده شده در مرحله اولیه، باید از یک قالب مناسب استفاده نمود. پس از بررسی های فراوان در زمینه قالب های مورد استفاده در متالورژی پودر، اقدام به طراحی و ساخت قالب دایره ای شکل شده است. این قالب از دو سنبه بالایی و پایینی و یک ماتریس که همگی از جنس فولاد سی کا ۴۵ می باشند، ساخته شده است. برای افزایش سختی سطحی، ماتریس و سنبه ها تا سختی ۵۸ الی ۶۰ راکول سخت کاری شده‌اند. بدین ترتیب آسیب های وارده به اجزای قالب حین عملیات فشردن کاهش می‌یابد. در روش زیتترینگ بدون فشار که ابتدا مرحله پرس و سپس عمل زیتترینگ انجام می‌گیرد، حین فشردن پودر اصطکاک دیواره قالب و پودر یک مشکل اساسی به شمار می‌رود. با افزایش فشار، بیرون‌اندازی توده پودر فشرده شده از قالب مشکل تر می‌شود. بنابراین برای کمینه کردن اصطکاک بین پودرها و جداره قالب و همچنین سهولت در بیرون اندازی قطعه، از روان کار استفاده می‌شود. روان کاری به دو روش صورت می‌پذیرد: روان کاری دیواره قالب و روان کاری پودر. همانگونه که در فصل قبل بیان شد، روان کاری قالب در ارجحیت قرار دارد. در این پژوهش برای روان کاری جداره قالب از استارات روی استفاده شده است. استارات روی به صورت پودر در بازار موجود می باشد. مقداری از پودر استارات روی با استون مخلوط شده و به صورت خمیر در آمده است. سپس به مدت یک ساعت در هوای آزاد قرار گرفته است تا

ساخت نمونه‌های تابعی نیکل-مس امکان استفاده از این سیستم-ها وجود نداشت. برای ساخت نمونه‌های اولیه مخلوط سازی پودرها به صورت دستی صورت می‌پذیرفت. روش کار به گونه‌ای بود که ابتدا پودرهای وزن‌گیری شده برای هر لایه به همراه ساچمه‌های آلومینایی در ظروف پلاستیکی مخصوصی ریخته می‌شدند. اندازه ساچمه‌های مورد استفاده به طور میانگین بین ۲ تا ۴ میلی‌متر بوده است. ساچمه باید به میزان حداقل دو برابر وزن پودرهای هر لایه در ظرف قرار گیرد و مجموع حجم ساچمه و پودر نیز نباید بیش از دو سوم حجم ظرف را اشغال کند. سپس ظرف حاوی پودرهای هر لایه به صورت جداگانه با دست به مدت ۱۰ دقیقه با فرکانس ۱ هرتز تکان داده شده است. این روش از ضریب اطمینان بسیار پایینی برخوردار بود و علاوه بر این کلوخه شدن پودرها را به دنبال داشت. همچنین تعداد نسبتاً زیاد لایه‌ها، فرایند مخلوط سازی را بسیار زمان بر می‌ساخت. در این تحقیق استفاده از یک سیستم ساده تر برای مخلوط سازی پودرهای نیکل و مس استفاده شده است. در این روش، یک دیسک دایره‌ای چوبی تهیه شده و با مکانیزمی خاص امکان نصب آن بر روی ماشین تراش میسر شده است. سپس ظروف حاوی پودر و ساچمه مربوط به هر لایه با تسمه های پلاستیکی بر روی این دیسک دوار محکم بسته شده‌اند. در پایان با تنظیم سرعت دستگاه بر روی ۶۰ دور بر دقیقه، دیسک دوار به مدت ۳۰ دقیقه می‌چرخد و پودرهای هر ظرف به خوبی با یکدیگر مخلوط می‌شوند. این روش اختلاط پودر را می‌توان در دسته مخلوط‌سازی نفوذی یا مخلوط‌سازی جابجایی قرار داد. در واقع پودرها اگر بدون ساچمه در کنار یکدیگر قرار گیرند، حین چرخش تمایل به قرار گرفتن در کمترین سطح انرژی را دارند و تنها از لبه‌های ظرف بر روی هم می‌غلتنند. استفاده از ساچمه و به چرخش درآوردن ظرف‌های حاوی پودر با استفاده از یک سیستم مکانیکی، باعث افزایش برخورد میان ذرات پودر شده و از کلوخه شدن مخلوط پودرها ممانعت به عمل می‌آورد. علاوه

اتوماتیک صورت می پذیرد. در نمونه های ساخته شده از دو فشار مختلف ۱۶۰ و ۲۰۰ مگاپاسکال استفاده شده است. پس از ایجاد استحکام اولیه در قطعه خام، باید عملیات زینترینگ صورت پذیرد تا استحکام مطلوب در ماده ایجاد شود. زینترینگ عموماً در دمایی بین ۷۰ تا ۹۰ درصد دمای ذوب ماده صورت می پذیرد. طی فرایند زینترینگ فصل مشترک بین ذرات پودر که در مرحله پرس بین آن ها فقط اتصال مکانیکی شکل گرفته است، از بین می رود. بنابراین نوع اتصال از حالت مکانیکی به اتمی تبدیل می گردد و سطح تماس بین ذرات افزایش می یابد. در نتیجه حجم قطعه کاهش یافته و در عوض دانسیته و استحکام آن افزایش می یابد. برای زینترینگ پودر فلزات در اتمسفر های خاص معیارهای متعددی وجود دارد. عموماً فلزات حین فرایند زینترینگ نیازمند حفاظت از اکسایش می باشند. از آنجایی که اکسیدها و سایر آلودگی ها اتصال میان دانه ها را از طریق نفوذ بین آن ها دچار وقفه می نمایند؛ با استفاده از اتمسفر مناسب می توان روان سازها و هم گیرهای به کار رفته در فرایند فشردن پودر را به خوبی از بین برد. همانگونه که در فصل پیش اشاره شد، استفاده از اتمسفر خلأ از سهولت بیشتری نسبت به اتمسفرهای دیگر برخوردار می باشد ولی تجهیزات آن بسیار گران قیمت می باشد. آرگون بهترین اتمسفر خنثی به شمار می رود که به صورت کپسول عرضه می شود. ولی به علت قیمت بالا کاربرد آن محدود بوده و فقط برای عملیات حرارتی آلیاژهای مخصوص از آن استفاده می شود. در این پژوهش برای زینترینگ نمونه های نیکل-مس تولید شده از دو نوع کوره مختلف استفاده شده است: کوره القایی و کوره عملیات حرارتی تحت اتمسفر آرگون. این کوره ها قابلیت برنامه پذیری برای دما و زمان زینترینگ را دارند. با توجه به مقالات بررسی شده و همچنین در نظر گرفتن دمای ذوب فلزات نیکل و مس، برای ساخت نمونه های نیکل-مس از دو دمای زینترینگ ۸۰۰ و ۸۵۰ درجه سانتیگراد استفاده شده است.

کمی سفت شده و به صورت صابونی شکل در آید. در پایان ماده به دست آمده به تمامی سطوح قالب مالیده شده و عملیات روان کاری صورت می پذیرد. برای شکل دهی مواد تابعی روش های مختلفی وجود دارد. ممکن است عملیات فشردن و زینترینگ به صورت همزمان صورت پذیرد و یا پس از فشردن، قطعه خام به دست آمده توسط یکی از روش های زینترینگ، زینتر شود. در این پژوهش برای ساخت ماده تابعی نیکل-مس از روش زینترینگ بدون فشار استفاده شده است. پس از آماده سازی پودر و روان کاری قالب، عملیات فشردن با استفاده از دستگاه پرس صورت پذیرفته و سپس قطعه خام به دست آمده در کوره زینتر شده است. پس از روان کاری قالب، پودرهای آماده سازی شده برای هر لایه در داخل قالب تزریق می شوند. همانگونه که اشاره شد، قالب مورد استفاده از دو سنبه بالایی و پایینی تشکیل شده که سنبه پایینی بر روی زیر کار ثابت شده است. با قرار دادن تعداد معینی از واشرهایی به ضخامت ۱ میلی متر می توان ارتفاع فضای خالی داخل ماتریس را تنظیم نمود. این ارتفاع باید به گونه ای تنظیم گردد که پس از ریختن پودر مربوط به هر لایه در قالب، سطح پودر با سطح آزاد ماتریس هم تراز باشد و بدین ترتیب بتوان سطح رویی پودر را صاف نمود. پس از تزریق کامل پودر تمامی لایه ها در داخل قالب، سنبه بالایی بر روی پودرها قرار می گیرد. در مرحله بعدی مجموعه سنبه و ماتریس حاوی پودر های نیکل-مس تحت عملیات فشردن قرار می گیرند. به منظور ایجاد استحکام اولیه در قطعه خام برای عملیات زینترینگ، فرایند فشردن صورت می پذیرد. برای فشردن لایه های پودری در ساخت ماده تابعی نیکل-مس از پرس یک طرفه هیدرولیکی با ظرفیت ۲۰۰ تن استفاده شده است. مجموعه قالب روی فک پایینی پرس قرار می گیرد و فک بالایی با فشار هیدرولیک به سمت پایین حرکت کرده و سنبه بالایی را روی پودر فشار می دهد. در پرس ۲۰۰ تنی پس از تنظیم فشار مورد نظر روی دستگاه، فرایند فشردن به صورت

۴- بحث و نتایج

در این پژوهش ۸ نمونه تابعی نیکل-مس با استفاده از روش متالورژی پودر ساخته شده است که مشخصات آن‌ها در جدول ۴ بیان شده است. تخلخل به عنوان معیاری کلی از ساختار منافذ قطعه، درصد خلل و فرج را نسبت به حجم کل آن مشخص می‌نماید. برای شکل‌های ساده تخلخل را از طریق اندازه‌گیری وزن و ابعاد و مقایسه مقادیر به دست آمده با مقادیر نظری تعیین می‌کنند. به منظور اندازه‌گیری تخلخل قطعات پیچیده‌تر با ساختارهای ناهمگن می‌توان از متالوگرافی نوری و روش‌های نقطه‌شماری استفاده نمود. به هر ترتیب باید این نکته مد نظر قرار گیرد که ساختار تخلخلی قطعه در اثر پرداخت کاری و حکاکی با اسید تغییر نکند. پرداخت کاری بیش از حد مقطع مورد بررسی باعث بسته شدن دهانه منافذ شده و در نتیجه تخلخل ظاهری سطح کم‌تر از میزان واقعی آن خواهد بود. از سوی دیگر حکاکی منافذ را باز کرده و مقدار تخلخل را بیش‌تر از مقدار واقعی نشان می‌دهد. در این پژوهش برای اندازه‌گیری چگالی از قانون ارشمیدس و غوطه‌ور کردن قطعه در آب بهره‌گیری می‌شود. در این روش ابتدا نمونه‌های نیکل-مس به مدت ۵ ساعت در آب جوشانیده شده است. پس از آن نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در آب باقی می‌مانند تا ذرات آب به خوبی در منافذ آن‌ها نفوذ نمایند. در مرحله بعدی نمونه در ترازوی مخصوص ارشمیدسی در آب از یک سیم آویزان شده و وزن غوطه‌وری آن اندازه‌گیری شده است. سپس آن را از آب خارج نموده و وزن اشباع (وزن تر) اندازه‌گیری شده است. در پایان نمونه‌های وزن‌گیری شده به مدت یک ساعت در دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد در یک دستگاه هیتر خشک‌کن قرار گرفته‌اند تا آب آن‌ها تبخیر شود. بدین ترتیب با خارج نمودن نمونه‌ها از هیتر وزن خشک آن‌ها نیز محاسبه شده است. با داشتن مقادیر اندازه‌گیری شده برای وزن غوطه‌وری، وزن اشباع و وزن

خشک می‌توان میزان تخلخل باز و درصد جذب آب هر نمونه را با استفاده از رابطه زیر محاسبه نمود.

$$\text{درصد تخلخل باز} = \frac{\text{وزن اشباع منهای وزن خشک} \times 100}{\text{وزن اشباع منهای وزن غوطه‌وری}}$$

$$\text{درصد جذب آب} = \frac{\text{وزن اشباع منهای وزن خشک} \times 100}{\text{وزن خشک}}$$

دانسیتته حجمی قطعه را نیز می‌توان با استفاده از رابطه زیر محاسبه نمود.

$$\text{دانسیتته حجمی} = \frac{\text{وزن خشک}}{\text{وزن اشباع منهای وزن غوطه‌وری}}$$

در شکل (۱) نمونه‌های ماده تابعی لایه‌ای نیکل-مس نشان داده شده است. برای بررسی خواص مواد تابعی ساخته شده، در ادامه آزمایش‌های مختلفی روی آنها انجام خواهد شد. جدول (۵) مقادیر درصد تخلخل باز، درصد جذب آب و دانسیته حجمی را برای نمونه‌های ساخته شده نشان می‌دهد.

همانگونه که در جدول فوق مشاهده می‌شود، با افزایش تعداد لایه‌ها در شرایط فشار و دمای برابر، میزان تخلخل باز و درصد جذب آب افزایش یافته و دانسیته حجمی نیز کاهش می‌یابد. با افزایش تعداد لایه‌ها از ۶ لایه به ۱۱ لایه در نمونه‌های ۲ و ۶ میزان تخلخل باز و درصد جذب آب به ترتیب ۵/۷٪ و ۱/۱۲٪ افزایش یافته است. در ساخت این دو نمونه از فشار ۱۶۰ مگاپاسکال و دمای زینترینگ ۸۰۰ درجه سانتیگراد استفاده شده است. همچنین میزان دانسیته حجمی در نمونه ۱۱ لایه‌ای به میزان ۳/۴٪ نسبت به نمونه ۶ لایه‌ای کاهش یافته است. با بررسی نمونه‌های ۵ و ۸ مشخص می‌شود که این پدیده در دما و فشار بالاتر نیز تکرار شده است. با افزایش تعداد لایه‌ها از ۶ لایه

لایه‌ای با استفاده از فشار ۲۰۰ مگاپاسکال ساخته شده‌اند. همچنین میزان دانسیته حجمی در نمونه ساخته شده در دمای زینترینگ بالاتر به میزان ۸٪ نسبت به نمونه ساخته شده در دمای زینترینگ پایین‌تر افزایش یافته است. با بررسی نمونه‌های ۶ و ۷ مشخص می‌شود که این پدیده در فشار پایین‌تر و تعداد لایه بالاتر نیز تکرار شده است. با افزایش دمای زینترینگ از ۸۰۰ به ۸۵۰ درجه سانتیگراد در این دو نمونه میزان تخلخل باز و درصد جذب آب به ترتیب ۶٪ و ۷٪ کاهش یافته است. این دو نمونه ۱۱ لایه‌ای با استفاده از فشار ۱۶۰ مگاپاسکال ساخته شده‌اند. میزان دانسیته حجمی در نمونه ساخته شده در دمای زینترینگ بالاتر به میزان ۱/۱٪ نسبت به نمونه ساخته شده در دمای زینترینگ پایین‌تر افزایش یافته است.

۵- تحلیل نتایج

برای مطالعه و آنالیز ماده تابعی نیکل-مس ساخته شده از میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شده است. برای این منظور قسمت مورد نظر از نمونه با استفاده از دستگاه کاتر جدا شده است. پس از برش‌زنی با توجه به اندازه کوچک نمونه‌ها قطعات مورد نظر با استفاده از دستگاه مانت گرم، مانت شده‌اند. در این مرحله با توجه به ابعاد قطعات، آن‌ها به صورت دو به دو درون استوانه‌ای از مواد پلاستیکی شفاف قرار گرفته‌اند. این پوشش به گونه‌ای نمونه‌ها را احاطه کرده است که سطح مورد نظر جهت عکس‌برداری بیرون از مواد پلاستیکی باشد. در شکل ۲ تصاویر مربوط به نمونه‌های نیکل-مس مانت شده نشان داده شده است.

در مرحله بعدی سطوح مورد نظر سنباده‌زنی و پولیش شده‌اند. پولیش‌کاری نمونه‌های ساخته شده با استفاده از دستگاه پولیش به صورت دستی صورت پذیرفته است. این دستگاه شامل یک دیسک چرخان با سرعت قابل تنظیم می‌باشد که با سنباده پوشانده شده است. در ابتدا سنباده‌زنی با استفاده از

به ۱۱ لایه در این دو نمونه میزان تخلخل باز و درصد جذب آب به ترتیب ۴/۱۰٪ و ۸/۱۵٪ افزایش یافته است. در ساخت این دو نمونه از فشار ۲۰۰ مگاپاسکال و دمای زینترینگ ۸۵۰ درجه سانتیگراد استفاده شده است. میزان دانسیته حجمی در نمونه ۱۱ لایه‌ای به میزان ۶/۴٪ نسبت به نمونه ۶ لایه‌ای کاهش یافته است. برای مقایسه تأثیر فشار بر روی مقادیر درصد تخلخل باز، درصد جذب آب و دانسیته حجمی، نمونه‌های ۲ و ۳ و نمونه‌های ۷ و ۸ به صورت دو به دو مورد بررسی قرار گرفته‌اند. با افزایش فشار از ۱۶۰ به ۲۰۰ مگاپاسکال در نمونه‌های ۲ و ۳ میزان تخلخل باز و درصد جذب آب به ترتیب ۶٪ و ۲/۹٪ کاهش یافته است. این دو نمونه ۶ لایه‌ای در دمای زینترینگ ۸۰۰ درجه سانتیگراد ساخته شده‌اند. میزان دانسیته حجمی در نمونه ساخته شده در فشار بالاتر به میزان ۴/۳٪ نسبت به نمونه ساخته شده در فشار پایین‌تر افزایش یافته است. با بررسی نمونه‌های ۷ و ۸ مشخص می‌شود که این پدیده در دما و تعداد لایه بالاتر نیز تکرار شده است. با افزایش فشار از ۱۶۰ به ۲۰۰ مگاپاسکال در این دو نمونه میزان تخلخل باز و درصد جذب آب به ترتیب ۷٪ و ۹/۸٪ کاهش یافته است. این دو نمونه ۱۱ لایه‌ای در دمای زینترینگ ۸۰۰ درجه سانتیگراد ساخته شده‌اند. میزان دانسیته حجمی در نمونه ساخته شده در فشار بالاتر به میزان ۸/۲٪ نسبت به نمونه ساخته شده در فشار پایین‌تر افزایش یافته است. برای مقایسه تأثیر دمای زینترینگ بر درصد تخلخل باز، درصد جذب آب و دانسیته حجمی، نمونه‌های ۳ و ۵ و نمونه‌های ۶ و ۷ به صورت دو به دو مورد بررسی قرار گرفته‌اند. همانگونه که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، با افزایش دمای زینترینگ در تعداد لایه یکسان و فشار برابر، میزان تخلخل باز و درصد جذب آب کاهش یافته و دانسیته حجمی نیز افزایش می‌یابد. با دمای زینترینگ از ۸۰۰ به ۸۵۰ درجه سانتیگراد در نمونه‌های ۳ و ۵ میزان تخلخل باز و درصد جذب آب به ترتیب ۸/۳٪ و ۶/۴٪ کاهش یافته است. این دو نمونه ۶

الکترون‌های مربوط به اتم‌های نمونه تحت بررسی، برخی از این الکترون‌ها از جای خودشان خارج می‌شوند. با توجه به اینکه جای اتم‌ها نمی‌تواند خالی بماند و بایستی به حالت تعادل برسند، الکترون‌هایی از لایه‌های بالاتر اتمی به این فضای خالی انتقال یافته و آن را پر می‌کنند. بدین ترتیب الکترون‌های لایه-های بالاتر که انرژی بیشتری دارند، باید بخشی از انرژی خود را از دست دهند تا به سطح انرژی لایه جدید رسیده و پایدار شوند. این انرژی بصورت اشعه ایکس ساتع می‌شود. با آنالیز ایدکس نمونه‌ها درصد وزنی عناصر تشکیل دهنده آن‌ها در هر لایه مشخص شده است. با استفاده از آنالیز ایدکس روی لایه-های نمونه‌های ۲ و ۴ می‌توان میزان تغییرات درصد وزنی دو ماده نیکل و مس را در لایه‌های نمونه‌های تابعی ساخته شده به دست آورد. سپس مقادیر به دست آمده از این آنالیز با درصد وزنی اعمال شده از مواد نیکل و مس قبل از فرایند شکل‌دهی مقایسه شده‌اند. نتایج بدست آمده در جدول ۶ نشان داده شده است.

همانگونه که در جدول فوق مشاهده می‌شود، درصد وزنی اعمال شده از مواد نیکل و مس قبل از فرایند شکل‌دهی نسبت به مقادیر به دست آمده از آنالیز ایدکس تغییرات بسیار کمی داشته است. علی‌رغم اینکه این مقادیر تا حدود زیادی به هم نزدیک می‌باشند، اختلاف جزئی مشاهده شده در درصد وزنی عناصر در بعضی از لایه‌ها ناشی از نفوذ پودرها در یکدیگر حین فرایندهای فشردن و زینترینگ و یا خطای آزمایشگاهی می‌باشد.

برای تعیین مقاومت ماده تابعی نیکل-مس در مقابل نفوذ از تست سختی استفاده شده است. پس از آماده‌سازی، نمونه‌های ۲، ۳ و ۴ برای اندازه‌گیری میکروسختی در دستگاه سختی‌سنج قرار گرفته‌اند. در روش میکروسختی از نیروهای کم‌تر از 1 کیلوگرم استفاده می‌شود. حین انجام تست روی نمونه‌های

سنباده‌های خشن صورت پذیرفته و به تدریج از سنباده‌های ملایم‌تر استفاده شده است. در پایان نیز با نرم‌ترین سنباده سطح نمونه کاملاً صاف شده است. در این روش سطح نمونه حول سنگ در مسیر و یا در جهت عکس دوران حرکت سنگ، از سمت مرکز به سمت لبه‌ها روی سطح سنباده قرار گرفته است. همچنین حین چرخش دیسک و فشردن نمونه روی سطح سنباده به منظور خنک کردن سطح، روی صفحه آب پاشیده می‌شود. پس از آماده‌سازی، نمونه‌های ۲، ۳ و ۴ جهت عکس‌برداری در دستگاه قرار گرفته‌اند که در ادامه نتایج به دست آمده بیان می‌شوند. با استفاده از عکس‌برداری می‌توان مرزبندی دانه‌ها و لایه‌بندی مواد تشکیل دهنده جسم مورد بررسی را مشخص نمود. در ابتدا با گرفتن عکس کلی از نمونه‌ها به بررسی ریزساختار ماده پرداخته شده تا به کمک آن بتوان ترک‌ها و حفره‌های ایجاد شده حین فرایند ساخت را مشاهده نمود. هرچه اختلاف میان عدد اتمی مواد تشکیل دهنده قطعه مورد بررسی بیشتر باشد، به دلیل اختلاف در پرتوهای ساتع شده از آن‌ها می‌توان این مرزبندی‌ها را با وضوح بالاتری مشاهده نمود. در بررسی نمونه‌های تابعی نیکل-مس ساخته شده به دلیل نزدیکی عدد اتمی مواد نیکل و مس، مرزبندی میان لایه‌ها را نمی‌توان به وضوح مشخص نمود. به همین منظور پس از گرفتن عکس کلی از نمونه‌ها، از تک تک لایه‌ها عکس‌برداری صورت پذیرفته است و تنها از یکی از لایه‌ها با بزرگ‌نمایی‌های مختلف عکس-برداری شده است. در شکل ۳ لایه اول نمونه‌ها مربوط به سطح مس می‌باشد با بزرگ‌نمایی ۵۰۰ نشان داده شده است.

همانگونه که در عکس‌های فوق مشاهده می‌شود هیچ ترکی در این سه نمونه وجود ندارد. برای مشخص کردن ترکیب عنصری از آنالیز ایدکس استفاده شده است. در این روش سطح نمونه توسط یک اشعه الکترونی درون میکروسکوپ تحت بمباران قرار می‌گیرد. با برخورد الکترون‌های این اشعه به

پژوهشی محدود صورت پذیرفته در داخل کشور سبب شد این پژوهش با هدف ساخت ماده تابعی صورت پذیرد. بدین منظور روش‌های مختلفی که برای ساخت این مواد مورد استفاده قرار گرفته‌اند با توجه به مزایا و معایبی که دارند مورد بررسی قرار گرفته‌اند. با توجه به امکانات موجود در کشور و مزایای روش متالورژی پودر از این روش برای ساخت ماده تابعی نیکل-مس استفاده شده است. در ادامه مراحل ساخت شامل آماده‌سازی پودر، تهیه قالب و فرایند شکل‌دهی به طور کامل تشریح شده‌اند. سپس با انجام آزمایشات مربوط به تخلخل و همچنین عکس-بردار از نمونه‌ها، کیفیت نمونه‌های ساخته شده مورد بررسی قرار گرفته است.

در راستای ساخت ماده تابعی و به منظور ایجاد گرادیان مورد نظر، پودرها با درصد‌های مورد نظر تهیه و در قالب تزریق شده‌اند. در ساخت نمونه‌های نیکل-مس از تعداد لایه، فشار و دمای زیتترینگ‌های مختلف استفاده شده است و به بررسی تأثیر این پارامترها بر فرایند ساخت پرداخته شده است. همانگونه که پیش‌تر به آن پرداخته شد، با افزایش تعداد لایه‌ها شیب گرادیان تغییرات دو ماده نیکل و مس در راستای ضخامت کاهش یافته و گرادیان یکنواخت‌تری به دست آمده است. با این وجود این امر در افزایش تخلخل باز و درصد جذب آب تأثیر گذار بوده است. این در حالیست که با افزایش فشار، پودرها در یکدیگر بیشتر نفوذ نموده و میزان تخلخل باز و درصد جذب آب به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است. این پدیده با افزایش دمای زیتترینگ نیز مشاهده شده است. بدین ترتیب می‌توان گفت نمونه‌های ساخته شده در فشار و دمای بالاتر از خواص بهتری برخوردار بوده‌اند. با توجه به نتایج به دست آمده، از نکات قابل توجه در ساخت نمونه‌های تابعی نیکل-مس می‌توان به کیفیت بالای نمونه‌های ساخته شده و عدم ایجاد ترک در آن‌ها اشاره نمود. همچنین تصاویر گرفته شده از نمونه‌ها به خوبی با نتایج

نیکل-مس با استفاده از نیروی ۵۰۰ گرمی، ابعاد محل اثر نیرو بزرگ بود که باعث شد از نیروهای کم‌تری چون ۳۰۰ و ۱۰۰ گرم استفاده شود. با این وجود باز هم محل اثر نیرو دارای ابعاد بزرگی بود که قابلیت اندازه‌گیری نداشت و بدین ترتیب امکان انجام میکروسختی و گرفتن سختی در راستای ضخامت قطعات ساخته شده وجود نداشت. به همین منظور از روش ماکرو برای اندازه‌گیری سختی استفاده شده است. از آنجایی که در قطعات ساخته شده به روش متالورژی پودر پراکندگی سختی زیاد می‌باشد، عموماً از روش ویکرز برای محاسبه سختی استفاده می‌شود. بار اعمالی در این روش برای قطعات متالورژی پودر نیز عموماً ۵ یا ۱۰ کیلوگرم می‌باشد که در این پژوهش برای انجام تست سختی ویکرز از نیروی ۱۰ کیلوگرمی استفاده شده است. پس از آماده‌سازی، بر روی هر سطح از نمونه‌های ۲، ۳ و ۴ سه مرتبه نیرو اعمال شده است که اعداد به دست آمده مربوط به سختی ویکرز برای این نمونه‌ها در جدول ۷ بیان شده است.

با مقایسه نمونه‌های ۲ و ۳ با استفاده از جدول فوق مشاهده می‌شود که با افزایش فشار در تعداد لایه یکسان و شرایط دمایی برابر، سختی قطعه افزایش یافته است. همچنین مقایسه نمونه‌های ۲ و ۴ نشان می‌دهد که با افزایش دما در تعداد لایه یکسان و شرایط فشار برابر نیز سختی قطعه به طور قابل توجهی افزایش یافته است. در مجموع می‌توان گفت نمونه ۴ که مطابق جدول ۵ از کمترین میزان تخلخل در بین نمونه‌های ساخته شده برخوردار بود، دارای سختی به مراتب بالاتری نیز نسبت به سایر نمونه‌ها می‌باشد. بدین ترتیب تأثیر افزایش دمای زیتترینگ بر ساخت نمونه‌های نیکل-مس نسبت به افزایش فشار محسوس‌تر بوده است.

۶- نتیجه گیری

کاربردهای فراوان این مواد در صنایع مختلف و زمینه‌های

- Graded Materials*, AIST Tsukuba Research center, Tsukuba, Japan, October 21-24, 1996.
- [2] Birman, L. W. Byrd, Modeling and analysis of functionally graded materials and structures, *Applied Mechanics Reviews*, Vol. 60, pp. 195–216, 2007.
- [3] T. P. D. Rajan, R. M. Pillai, B.C. Pai, Characterization of centrifugal cast functionally graded aluminum-silicon carbide metal matrix composites, *Journal of Materials Characterization*, Vol. 61, pp. 923-928, 2010.
- [4] S. El-Hadad, H. Sato, E. M. Fujiwara, Y. Watanabe, Fabrication of Al/Al₃Ti functionally graded materials by reaction centrifugal mixed-powder method, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 50, 2011.
- [5] W. M. Rubio, G. H. Paulino, E. C. N. Silva, Analysis, Manufacture and characterization of Ni/Cu functionally graded structures, *Journal of Materials and Design*, Vol. 38, 2012.
- [6] Y. Watanabe, E. M. Fujiwara, H. Sato, Fabrication of Functionally Graded Materials by Centrifugal Slurry-Pouring Method, *Journal of Powder Metallurgy*, Vol. 57, pp. 321-326, 2010.
- [7] Y. Watanabe, Y. Inaguma, H. Sato, Cold Model for Process of a Ni-aluminide/Steel Clad Pipe by a Reactive Centrifugal Casting Method, *Journal of Material*, Vol. 65, pp. 467-470, 2011.
- [8] M. Tokita, Mechanism of spark plasma sintering, Sumitomo Coal Mining Company, Kanagawa Japan.
- [9] N. S. Ghafil, Fabrication and characterization of stepwise Cu-Ni functionally graded materials, *Materials Engineering Department MS.C*, 2011.
- [10] J. Zhu, Z. Lai, Z. Yin, J. Jeon, S. Lee, Fabrication of ZrO₂-NiCr functionally graded material by powder metallurgy, *Materials chemistry and physics*, Vol. 68, pp. 130-135, 2001.
- [11] M. L. Pines, H. A. Bruck, Powder processing of functionally graded metal-ceramic plates using pressureless sintering, *Department of Mechanical Engineering University of Maryland College Park*, MD 20742, 2005.
- [12] Y. Seungkyn, K. Hyungsub, L. S. Caroline, Investigation of shrinkage control in Ni–Al₂O₃

به دست آمده از محاسبه میزان تخلخل در نمونه‌ها مطابقت داشته است. در ادامه با آنالیز ایدکس روی نمونه‌ها، تغییر تدریجی دو ماده نیکل و مس در یک راستای مشخص به خوبی مشاهده شده است. با استفاده از آنالیز ایدکس روی لایه‌های نمونه‌های تابعی ساخته شده نیز میزان تغییرات درصد وزنی دو ماده نیکل و مس در این نمونه‌ها به دست آمده است. با مقایسه این مقادیر با درصد وزنی اعمال شده از مواد نیکل و مس قبل از فرایند شکل‌دهی، تفاوت ناچیزی میان آن‌ها مشاهده می‌شود و ایجاد گرادیان مورد نظر در نمونه‌ها را تا حدود زیادی موفقیت-آمیز بیان می‌نماید. این در حالیست که اختلاف جزئی مشاهده شده در درصد وزنی عناصر در بعضی از لایه‌ها ناشی از نفوذ پودرها در یکدیگر حین فرایندهای فشردن و زیت‌رینگ و یا خطای آزمایشگاهی می‌باشد.

۷- سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از دانشگاه آزاد واحد تاکستان و معاونت پژوهشی جهت در اختیار دادن امکانات دانشگاه کمال تشکر را دارند. همچنین از آقای مارکو آلفانو از دانشگاه کالابریا ایتالیا جهت مشاوره در انجام کارهای ساخت تشکر می‌گردد.

۸- فهرست علائم و نشانه‌ها

α	ضریب انبساط حرارتی
E	مدول الاستیسیته
ν	نسبت پواسون
K	ضریب انتقال حرارتی

۹- مراجع

- [1] Y. Miyamoto, M. Niin, M. Koizumi, FGM research programs in Japan, *Proceedings of the 4th international symposium on Functionally*

- curved non-planar cracks in FGMs, *Mechanics Research Communications*, Vol. 38, pp. 17-23, 2011.
- [19] R. Ghajar, A. S. Moghaddam, Numerical investigation of the mode III stress intensity factors in FGMs considering the effect of graded Poisson's ratio, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 78, pp. 1478-1486, 2011.
- [20] A. S. Moghaddam, M. Alfano, R. Ghajar, Determining the mixed mode stress intensity factors of surface cracks in functionally graded hollow cylinders, *Materials and Design*, Vol. 43, pp.475-484, 2013.
- (Metal-Ceramic) functionally graded materials, *Journal of Ceramics International*, Vol. 39, pp. 93-99, 2013.
- [13] G. Anne, J. Vleuge, O. V. D. Biest, Functionally Graded Ceramics, *Katholieke University Leuven, Belgium*, chapter 22, pp 575-596, 2006,
- [14] M. L. Pines, Pressureless Sintering of Powder Processed Functionally Graded Material-Ceramic Plates, *Thesis submitted to the Faculty of the Graduate School of the University of Maryland*, 2004.
- [15] A. S. Moghaddam, A. Mohammadian, M. Alijani, S. Karami, Fabrication of Nickel-Alomina graded materials by pressureless sintering. *Advanced composite materials*. Accepted for publication, 2015.
- [16] R. Ghajar, S. Peyman, A. Shaghaghimoghadam, Computation of dynamic stress intensity factors for three-dimensional cracks in functionally graded materials using interaction integral method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 14, pp. 108-116, 2015 (In Persian)
- [17] R. Ghajar, A. S. Moghaddam, M. Alfano, An improved numerical method for computation of stress intensity factors along 3D curved non-planar cracks in FGMs, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 48, pp. 208-216, 2011.
- [18] A. S. Moghaddam, R. Ghajar, M. Alfano, Finite element evaluation of stress intensity factors in

جدول (۱): خواص ترموفیزیکی و مکانیکی فلزات نیکل و مس

نیکل	مس	خاصیت
۸/۸۸	۸/۹۶	چگالی ρ gr/cm ³
۱۴۵۳	۱۰۸۴	دمای ذوب °C
۷۰	۴۰۰	ضریب انتقال K W/m°C
۲۰۰	۱۳۰	مدول الاستیسیته E GPa
۰/۳۱	۰/۳۴	نسبت پواسون ν
۶۳۸	۳۶۹	سختی ویکرز MN/m ²
۱۳/۴	۱۶/۵	ضریب انبساط α $\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$

جدول (۲): اندازه و مقدار ذرات مورد استفاده در ساخت نمونه نیکل- مس یازده لایه‌ای ساخته شده به روش متالورژی پودر

چگالی	جرم لایه	جرم نیکل		جرم مس		درصد نیکل
		۲/۵ میکرون	۱۰ میکرون	۲۵ میکرون	۴۵ میکرون	
gr/Cm ³	gr					%
۸/۸۸	۲	۲	۰	۰	۰	۱۰۰
۸/۸۹	۲	۰/۹	۰/۹	۰	۰/۲	۹۰
۸/۹۰	۲	۰	۱/۶	۰	۰/۴	۸۰
۸/۹۰	۲	۰	۱/۴	۰	۰/۶	۷۰
۸/۹۱	۲	۰	۱/۲	۰	۰/۸	۶۰
۸/۹۲	۲	۰	۱	۰	۱	۵۰
۸/۹۳	۲	۰	۰/۸	۰	۱/۲	۴۰
۸/۹۴	۲	۰	۰/۶	۰	۱/۴	۳۰
۸/۹۴	۲	۰	۰/۴	۰/۸	۰/۸	۲۰
۸/۹۵	۲	۰	۰/۲	۱/۸	۰	۱۰
۸/۹۶	۲	۰	۰	۱	۰	۰

جدول (۳): اندازه و مقدار ذرات مورد استفاده در ساخت نمونه نیکل-مس شش لایه‌ای ساخته شده به روش متالورژی پودر

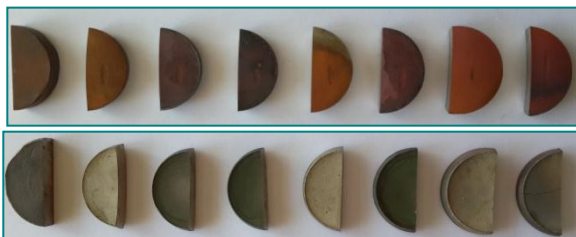
درصد نیکل	چگالی gr/Cm ³	جرم لایه gr	جرم نیکل		جرم مس	
			۲/۵ میکرون	۱۰ میکرون	۲۰ میکرون	۵۰ میکرون
۱۰۰	۸/۸۸	۴	۴	۰	۰	۰
۸۰	۸/۹۰	۴	۱/۶	۱/۶	۰	۰/۸
۶۰	۸/۹۱	۴	۰	۲/۳۹	۰	۱/۶۱
۴۰	۸/۹۳	۴	۰	۱/۶	۱/۲	۱/۲
۲۰	۸/۹۴	۴	۰	۰/۷۹	۳/۲۱	۰
۰	۸/۹۶	۴	۰	۰	۴	۰

جدول (۷): مقادیر سختی ویکرز برای نمونه‌های نیکل-مس

نمونه	سطح	مقادیر سختی ویکرز در نقاط مختلف		
۲	مس	۱۸/۳	۱۸/۶	۱۸/۵
	نیکل	۵۲/۹	۵۴/۶	۵۸/۲
۳	مس	۲۶/۴	۲۷/۳	۲۶/۵
	نیکل	۶۶/۵	۶۳/۳	۶۵/۴
۴	مس	۳۱/۴	۳۰/۱	۳۲/۷
	نیکل	۶۳/۶	۶۷/۲	۶۴/۹

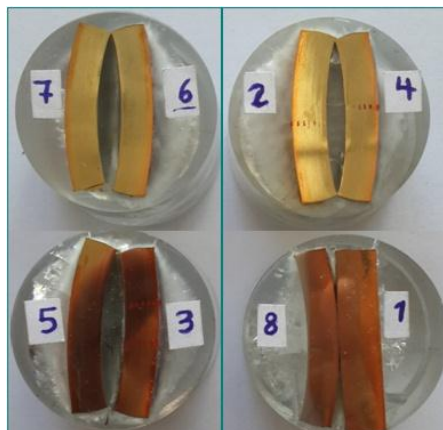
جدول (۴): مشخصات نمونه نیکل-مس ساخته شده

نمونه	تعداد لایه	فشار MPa	دمای زینترینگ °C
۱	۶	۱۶۰	۸۰۰
۲	۶	۱۶۰	۸۰۰
۳	۶	۲۰۰	۸۰۰
۴	۶	۱۶۰	۸۵۰
۵	۶	۲۰۰	۸۵۰
۶	۱۱	۱۶۰	۸۰۰
۷	۱۱	۱۶۰	۸۵۰
۸	۱۱	۲۰۰	۸۵۰

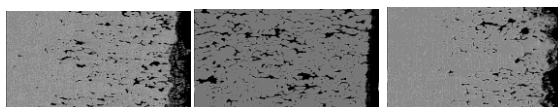


شکل (۱): نمای سطح برش خورده نمونه‌های نیکل-مس (از سمت

چپ به ترتیب نمونه‌های ۱ تا ۸)



شکل (۲): نمونه‌های نیکل-مس در پوشش مانیت



الف) نمونه ۲ (ب) نمونه ۳ (پ) نمونه ۴

شکل (۳): عکس برداری از لایه اول نمونه‌ها

جدول (۵): برخی خواص نمونه‌های نیکل-مس ساخته شده

نمونه	% تخلخل باز	% جذب آب	دانسیته
۱	۳۹/۷۳	۷/۴۷	۵/۳۲
۲	۳۳/۶۶	۵/۷۸	۵/۸۳
۳	۳۱/۶۳	۵/۲۵	۶/۰۳
۴	۲۷/۲۵	۴/۳۳	۶/۳۰
۵	۳۰/۴۳	۵/۰۱	۶/۰۸
۶	۳۶/۱۷	۶/۴۸	۵/۵۸
۷	۳۵/۹۶	۶/۳۷	۵/۶۴
۸	۳۳/۶۰	۵/۸۰	۵/۸۰

جدول (۶): درصد وزنی نیکل و مس در لایه‌ها برای نمونه ۲ و ۴

لایه	درصد وزنی خوانده شده از ایدکس		درصد وزنی	
	نمونه ۲	نمونه ۴	نیکل	مس
۱	۰	۱۰۰	۰/۲۷	۹۹/۷۳
۲	۲۰	۸۰	۱۸/۷۶	۸۱/۲۴
۳	۴۰	۶۰	۴۰/۹۴	۵۹/۰۶
۴	۶۰	۴۰	۵۸/۷	۴۱/۳
۵	۸۰	۲۰	۷۶/۸۴	۲۳/۱۶
۶	۱۰۰	۰	۹۹/۹۹	۰/۰۱