



## بررسی علت جوشکاری نشدن به روش جوشکاری الکترو دستی (SMAW) در قطعات متالورژی پودر

امین آقائی بدلیو

مدرس دانشگاه فنی و حرفه ای، دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک ارومیه-ایران

سید اکبر سیدشجاعی

اعضای واحد مهندسی متالورژی پودر ارومیه، مهندسی مواد - متالورژی ارومیه - ایران

### چکیده:

صنعت پودر فلز، یک فناوری شناخته شده شکل دهی فلز است که به طور مستقیم با سایر روش های فلزکاری مانند ریخته گری، آهنگری، مهر زنی (ریز خالی کردن) و ماشینکاری پیچ رقابت می کند. (جوشکاری) یکی از روش های ساخت می باشد که هدف آن اتصال دائمی مواد مهندسی از قبیل فلز، سرامیک، پلیمر و کامپوزیت به یکدیگر است؛ و این کار معمولاً از طریق ایجاد حرارت بالا و ذوب ماده و سپس سرد کردن برای ایجاد جوش انجام می شود. جوشکاری الکترو دستی Shielded Metal Arc Welding (SMAW) فرآیندی است که در آن از الکتروود فلزی روکش دار برای انتقال جریان استفاده می شود جریان باعث ایجاد قوس در فاصله بین نوک الکتروود و قطعه کار می گردد مقاومت الکتریکی حرارت کافی برای ذوب فلز پایه و الکتروود ایجاد می کند. روش های مختلف جوشکاری بر قطعات متالورژی پودر حفره ها مانند عایقی عمل می کنند که انتقال حرارت را کاهش داده، در نتیجه قطعات متالورژی پودر نسبت به قطعات کار شده با ترکیب شیمیایی یکسان، سختی پذیری کمتری خواهند داشت، اما به دلیل تراکم ذاتی ناشی از ذوب ذرات در ناحیه متأثر از حرارت (HAZ) تنشهای بالاتر همراه با سختی پذیری بیشتر در قطعات متالورژی پودر دیده میشود و میتواند حساسیت مواد به ترک خوردن را نیز بالا ببرد. به دلیل تراکم ذاتی ناشی از ذوب ذرات در ناحیه متأثر از حرارت (HAZ) تنشهای بالاتر همراه با سختی پذیری بیشتر در قطعات متالورژی پودر دیده میشود و میتواند حساسیت مواد به ترک خوردن را نیز بالا ببرد

**کلمات کلیدی:** متالورژی پودر، جوشکاری، تخلخل



## مقدمه:

## متالورژی پودر:

متالورژی پودر یک مسیر تولیدی جذاب برای تولید قطعات با استفاده از پودر فلزات است که از نظر اقتصادی مقرون به صرفه بوده و تولید قطعات با انواع اشکال را تسهیل می کند. متالورژی پودر امروزه به طور گسترده ای مورد استفاده قرار می گیرد و جایگزین مناسبی برای روش های قدیمی آن است. متالورژی پودر یک فرآیند تشکیل فلز است که با حرارت دادن پودرهای فلزی متراکم شده تا زیر نقطه ذوب آنها انجام می شود در واقع فرآیند متالورژی پودر شامل مخلوط کردن پودر عنصری یا آلیاژی، فشردن مخلوط در قالب و سپس تف جوشی یا گرم کردن شکل حاصل در یک اتمسفر کنترل شده است. متالورژی پودر یک روش بسیار توسعه یافته برای تولید مواد آهنی و غیر آهنی است. این یک فرآیند با کمترین میزان تراشه است.

متالورژی پودر امکان پردازش مواد با نقطه ذوب بسیار بالا از جمله فلزات نسوز مانند تنگستن، مولیبدن و تانتالیوم را فراهم می کند. تولید چنین فلزاتی از طریق ذوب و ریخته گری بسیار دشوار است و اغلب در حالت ریخته گری بسیار شکننده هستند. گردش مالی سالانه متالورژی پودر در بازار اروپا بیش از شش میلیارد یورو است، حتی تولید جهانی پودر فلز بیش از یک میلیون تن است. جدا از روش ریخته گری که فقط در فلزات زود گذار قابل استفاده است، روش متالورژی پودر تقریباً در همه مواد قابل اجرا است. بیشتر محصولاتی که با استفاده از روش متالورژی پودر تولید می شوند، نمی توانند با روش ریخته گری تولید شوند.

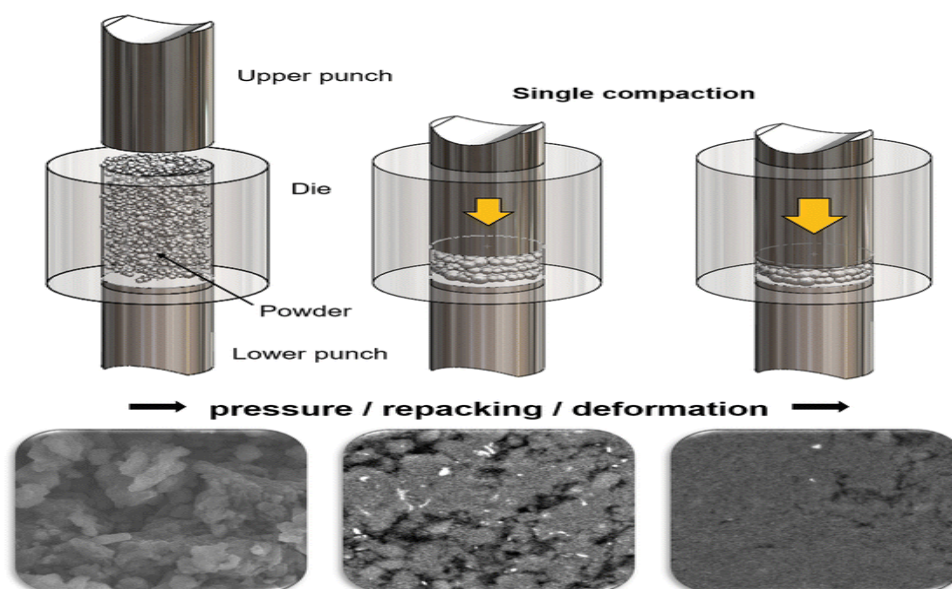


شکل ۱- قطعات متالورژی پودر



**متالورژی پودر (PM)** تولید و استفاده از پودرهای فلزی است. پودرها به ذراتی گفته می‌شود که معمولاً اندازه آنها کمتر از ۱۰۰۰ نانومتر (۱ میلی متر) است. بیشتر ذرات فلزی مورد استفاده در PM در محدوده ۵ تا ۲۰۰ میلی متر قرار دارند. برای بیان این موضوع، موی انسان معمولاً در محدوده ۱۰۰ میلی متر (۳.۹ میلی متر) قرار دارد. صنعت پودر فلز، یک فناوری شناخته شده شکل دهی فلز است که به طور مستقیم با سایر روش های فلزکاری مانند ریخته گری، آهنگری، مهر زنی (ریز خالی کردن) و ماشینکاری پیچ رقابت می کند. این صنعت شامل تامین کنندگان پودر و قطعه سازان، به علاوه شرکت هایی است که تجهیزات اختلاط، تجهیزات جابجایی پودر، پرس های متراکم، کوره های تف جوشی و غیره را تامین می کنند. فرآوری متالورژی پودر مزایای زیادی دارد. فرآیند PM در مقایسه با سایر فن آوری های شکل دهی فلزات، در مواد و انرژی کارآمد است

متالورژی پودر برای ساخت **قطعات با شکل پیچیده** مقرون به صرفه است و نیاز به ماشینکاری را به حداقل می رساند. طیف وسیعی از مواد مهندسی شده در دسترس است و از طریق انتخاب مواد و فرآیند مناسب، ریزساختار مورد نیاز ممکن است در مواد ایجاد شود. قطعات متالورژی پودر سطح خوبی دارند و ممکن است برای افزایش استحکام یا مقاومت در برابر سایش عملیات حرارتی شوند. در صورت لزوم، ریز تخلخل کنترل شده می تواند برای خود روانکاری یا فیلتراسیون ارائه شود. در حالی که دقت ابعاد خوب است، معمولاً با قطعات ماشینکاری شده مطابقت ندارد. در مورد قطعات PM آهنی، در مقایسه با فولاد ریخته گری نشده، شکل پذیری کمتر و مقاومت ضربه ای کمتری دارند. اکثر قطعات PM متخلخل هستند و هنگام انجام عملیات تکمیلی باید به آن توجه شود.



شکل ۲- شماتیک پرس پودر



فناوری متالورژی پودربه طور گسترده در ساخت قطعات مکانیکی مختلف استفاده می شود، زیرا توانایی تولید قطعات نزدیک به شبکه را دارد که هزینه های تولید را کاهش می دهد. فولاد PM با پخت عمدتاً پودر فریت، پودر کربن و پودر مس در دمای بالا تولید می شود. از این رو برخی از منافذ در فولاد PM گنجانده شده است. منافذ در فولاد PM باعث افزایش سرعت سایش ابزار می شود، زیرا منافذ هدایت حرارتی را کاهش می دهد و منافذ نیروی ضربه ای را به صفحه ابزار القا می کند (J. Capus)

تفاوت عمده در شکست خستگی فولادهای متالورژی پودر (PM) نسبت به فولادهای متراکم فرورژه یا ریخته گری شده، تأثیر منافذ بر شروع و انتشار ترک است. علاوه بر کاهش سطح باربری نمونه، منافذ باعث تمرکز تنش موضعی در داخل ماده می شوند (Piotrowski A) بنابراین، تغییر شکل پلاستیک شروع ترک در مجاورت منافذ رخ می دهد (Cotterell B) علاوه بر این اثر میکروناچ، منافذ تشکیل پله های لغزش را با حرکت لغزشی نابجایی، ترجیحاً روی سطوح آزاد اتصالات بیندزه ای ممکن می سازند (Slesar M, Dudrova)

## جوشکاری:

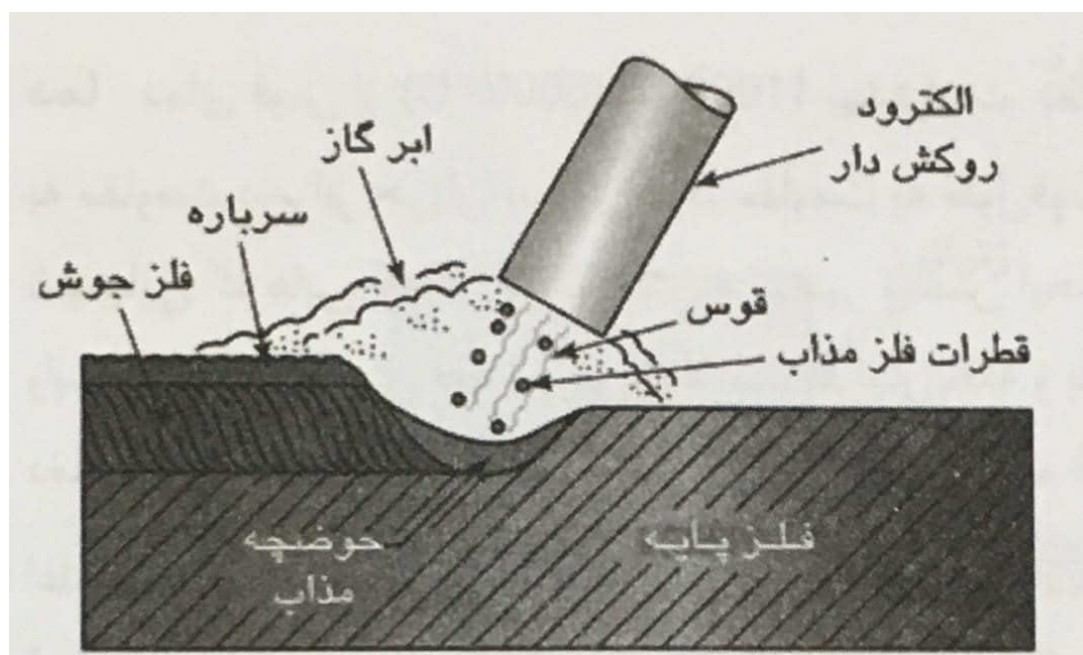
(جوشکاری) به انگلیسی (Welding) یکی از روش های ساخت می باشد که هدف آن اتصال دائمی مواد مهندسی از قبیل فلز، سرامیک، پلیمر و کامپوزیت به یکدیگر است؛ و این کار معمولاً از طریق ایجاد حرارت بالا و ذوب ماده و سپس سرد کردن برای ایجاد جوش انجام می شود. جوشکاری با روش های اتصال دما پایین تری مانند لحیم کاری نرم (Soldering) و لحیم کاری سخت (Brazing) که در آنها فلز پایه ذوب نمی شود، تفاوت دارد.

در جوشکاری علاوه بر ذوب فلز پایه، معمولاً از یک ماده به عنوان پرکننده نقطه اتصال (Filler) استفاده می شود تا حوضچه ای از مواد مذاب ایجاد گردد که پس از خنک شدن و ایجاد اتصال می تواند از فلز یا ماده پایه نیز قوی تر باشد. همچنین ممکن است از فشار در کنار گرما یا به تنهایی برای تولید جوش استفاده گردد. ضمناً در جوشکاری به نوعی محافظ برای حفاظت از فلزات پرکننده یا فلزات ذوب شده در برابر اکسید شدن یا آلودگی نیاز است. برای ایجاد حرارت مورد نیاز جوشکاری از منابع انرژی متعددی می توان استفاده کرد، از قبیل: شعله گاز، قوس الکتریکی، لیزر، پرتوی الکترون، اصطکاک، و امواج مافوق صوت. همچنین جوشکاری در محیط های صنعتی مختلفی قابل اجراست از قبیل: هوای آزاد، جوشکاری زیر آب، و خارج از اتمسفر زمین. جوشکاری یک کار خطرناک است و برای جلوگیری از سوختگی، شوک الکتریکی، آسیب چشمی و دید، استشاق گازهای سمی و دود و قرار گرفتن در معرض اشعه ماوراء بنفش شدید، نیاز به احتیاط می باشد (ویکی پدیا)

جوشکاری الکترود دستی (Shielded Metal Arc Welding (SMAW فرآیندی است که در آن از الکترود فلزی روکش دار برای انتقال جریان استفاده می شود جریان باعث ایجاد قوس در فاصله بین نوک الکترود و قطعه کار می گردد مقاومت الکتریکی حرارت کافی برای ذوب فلز پایه و الکترود ایجاد می کند. فلز مذاب الکترود از میان قوس به حوضچه مذاب روی فلز پایه انتقال می یابد و در آنجا با فلز پایه مخلوط می شود. انتهای نوک الکترود و حوضچه مذاب به وسیله گاز مثل باره احاطه تسویه و محافظت می شود. گاز و سرباره ناشی از سوختن یا بخار شدن ترکیبات پوشش الکترود است. با دور شدن قوس مخلوط الکترود و فلز پایه مذاب منجمد شده و یکپارچه می شود.



جوشکاری در جریان پالسی مختص روش‌های جوشکاری است که در محیط گازهای محافظ MIG/MAG و WIG انجام می‌شود و به دلیل مزایایی که این روش به‌ویژه کنترل حالت انتقال و توان ارائه می‌کند، از نظر فناوری و کیفیت فرآیند جذاب است. به اجزاء معرفی شده است. استفاده از جریان پالسی در جوشکاری دستی با الکترودهای پوشش داده شده یک چالش جدید برای منابع مبتنی بر اینورتر مدرن با مزایای تکنولوژیکی بالقوه است. در این مورد، مزیت جریان پالسی به کنترل حمام فلز مذاب، حجم آن در نتیجه انجماد جزئی، شبیه به جوشکاری WIG دستی با استفاده از جریان پالسی فرکانس پایین  $< 5$  هرتز مرتبط است. این مقاله برخی از مسائل تکنولوژیکی مربوط به استفاده از جریان پالسی را در مورد جوشکاری دستی با الکترودهای پوشش داده شده توسط نوسان نگاری قوس ارائه می‌کند. تحقیق تجربی با هدف ثبت شکل پالس‌های جریان برای مارک‌ها و قطرهای مختلف الکترودها و پارامترهای مختلف جریان جوشکاری، سطوح مختلف فرکانس پالس‌ها و تحلیل اسیلوگرام‌ها از طریق تغییرات جریان جوشکاری و ولتاژ قوس به منظور توضیح پدیده‌هایی که در قوس هنگام جوشکاری رخ می‌دهد. این همچنین به درک بهتر مسائل تکنولوژیک در مورد جوشکاری دستی با الکترودهای پوشش داده شده در جریان پالسی اجازه می‌دهد. (میرچه بورکا\*، یوان لوکاجیو)



شکل ۳- شماتیک جوشکاری الکتروده دستی

فرایند جوشکاری با الکتروده از لحاظ جوشکاری ضخامت‌های مختلف در وزن‌های مختلف بسیار با انعطاف است. با یک دستگاه می‌توان و به نازکی دو میلیمتر تا ضخامت چندین فوت را با تنظیمات مختلف جوشکاری کرد. قابلیت انعطاف فرایند اجازه می‌دهد که ورقه‌هایی در این محدوده ضخامت و در هر وضعیتی را جوشکاری کرد. جوشکاری الکتروده به راحتی قابل حمل و نقل است و چون انتقال تجهیزات آسان است و نیز دستگاه‌های با منبع ژنراتور و موتور برق وجود دارند تجهیزات کم این پروسه باعث قابلیت انتقال آسان آن می‌شود. از این فرآیند برای چندین منظور از جمله جوشکاری فلزات و آلیاژهای مختلف چدن آلومینیوم فولاد زنگ نزن و نیکل استفاده می‌شود. این فرایند در صنعت دارای بیشترین استفاده می‌باشد.





جریان جوشکاری یک جریان الکتریکی و جریان الکتریکی جریان الکترونها است. مقاومت در برابر حرکت الکترونها حرارت ایجاد میکند و هر قدر مقاومت بالاتر باشد حرارت بیشتری تولید می شود. هوا بیشترین مقاومت در برابر جریان الکترون را دارد. اگر الکترون از فاصله هوایی بین الکترونها و قطعه کار عبور کند حرارت زیادی تولید می شود. الکترون ها از فاصله هوایی عبور کرده و قوس ایجاد می شود. دمای قوس بیش از ۶۰۰۰ درجه سانتیگراد است.

### عوامل موثر بر انتخاب شدت جریان

- **ضخامت فلز پایه:** میزان شدت جریان مورد نیاز جوشکاری با ضخامت فلز پایه رابطه مستقیم دارد و هر چه ضخامت فلز پایه بالاتر رود، شدت جریان بیشتری برای جوشکاری مورد نیاز می باشد.
- **قطر الکترونها:** هر الکترونها بسته به سایز خود نیاز به شدت جریان خاصی جهت ذوب شدن دارد برای انتخاب شدت جریان مناسب باید به کاتالوک تولید کننده الکترونها مراجعه کرد.
- **نوع پوشش الکترونها:** عمدتاً چهار نوع پوشش در الکترونها وجود دارد که هر کدام بسته به شرایط خاص خود شدت جریان مناسبی نیاز دارند.
- **نوع اتصال:** انواع طراحی اتصالات جوشکاری بسته به میزان نفوذ و عوامل مشابه در انتخاب شدن جریان تاثیر گذار خواهند بود.
- **موقعیت الکترونها:** موقعیت های مختلف جوشکاری الکترونها به واسطه نیاز به کنترل نرخ ذوب در انتخاب شدت جریان موثر هستند

### تخلخل قطعات متالورژی پودر:

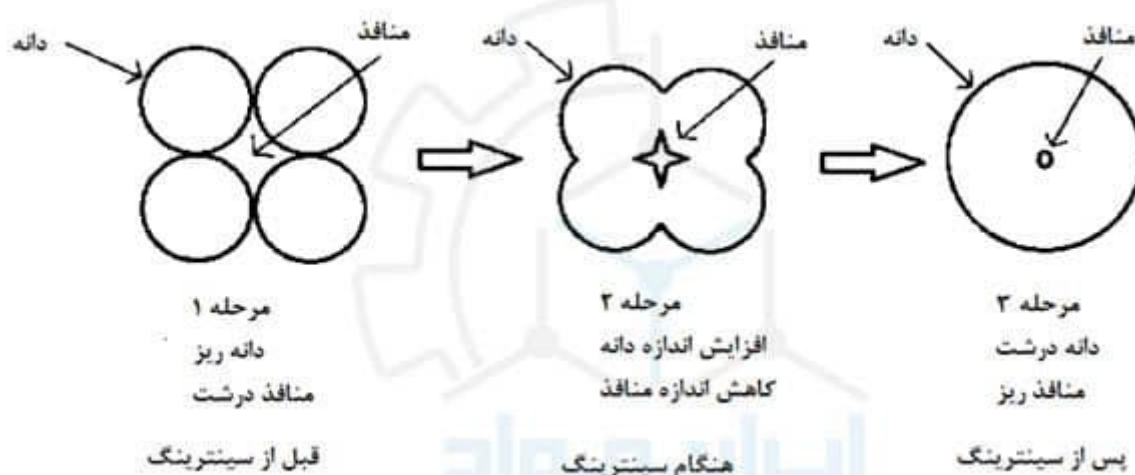
#### مراحل سینترینگ

**مرحله ۱:** هنگام مجاورت دو ذره، تماس اولیه برقرار شده و نیروهای بین اتمی عمل خواهند کرد. در این هنگام رشد گردنه تابع کاهش انرژی آزاد سطح است. مکانیزم های نفوذ سطحی، انتقال از مرز، نفوذ شبکه ای از روی مرز و نابه جایی ها موجب رشد گردنه در این مرحله می شود.

**مرحله ۲:** این مرحله در سینترینگ نقش اساسی دارد. همان طور که با رشد دانه تراکم بیشتر می شود، حفره ها صاف تر شده و به صورت کروی و بسته در می آیند. در این مرحله، رشد گردنه ادامه پیدا می کند. در این مرحله، حفره ها به سمت مرزدانه حرکت کرده و در آن متمرکز می شوند و سطوح آنها کاهش می یابد، به طوری که در نهایت سطح ذرات به ۵۰ درصد نسبت به قبل از مرحله اولیه سینترینگ می رسد.



**مرحله ۳:** در این مرحله، حفره‌های کروی شکل از مرز جدا می‌شوند و با افزایش زمان سینترینگ، ابعاد ذره و خلل و فرج افزایش یافته و درصد تخلخل کم می‌شود. کاهش تخلخل به چگالی، شعاع تخلخل و نفوذ حجمی وابسته است. افزایش زمان و درجه حرارت موجب تاثیرات منفی از قبیل انقباض بیشتر، رشد دانه‌ها و بالارفتن هزینه می‌گردد و افزایش فشار نیز سایش ابزار را در پی دارد.



نقاط تماس بین دانه‌های پودر در اثر رشد به گلولی تبدیل شده و پس از مرحله نخست، وضعیت شکل مرزدانه و حفره، آهنگ سینترینگ را کنترل می‌کند. در ابتدای مرحله دوم، هندسه حفره‌ها بسیار پیچیده است و حفره‌ها در محل تقاطع مرزدانه‌ها قرار دارند. در اثر ادامه سینترینگ، هندسه حفره‌ها به سمت استوانه میل کرده و کوچک‌شدن شعاع حفره‌ها موجب چگالش می‌شود. در مرحله سوم، هندسه حفره‌ها می‌توانند رشد دانه‌ها را کند کنند و به همراه مرزدانه‌های در حال حرکت و رشد کشیده شده و حرکت نمایند. (ایران مواد)





یکی از مهمترین خواص قطعات متالورژی پودر که آن را از دیگر مواد متمایز میکند، تأثیر حفرات آن بر اتصالشان می باشد. حجم تخلخل یا چگالی مربوطه اثر قابل توجهی بر بعضی ویژگیها داشته که آنها نیز به تبع بر جوشکاری مواد تأثیر می گذارند

هدایت گرمایی به میزان تخلخل بستگی دارد. هر چه میزان تخلخل بیشتر باشد، مکانیزم انتقال حرارت تغییر کرده و در پی آن پارامترهای جوشکاری نیز تغییر میکنند. سختی پذیری وابسته به نرخ انتشار گرما یا هدایت گرمایی است. روش های مختلف جوشکاری بر قطعات متالورژی پودر حفره ها مانند عابقی عمل می کنند که انتقال حرارت را کاهش داده، در نتیجه قطعات متالورژی پودر نسبت به قطعات کار شده با ترکیب شیمیایی یکسان، سختی پذیری کمتری خواهند داشت، اما به دلیل تراکم ذاتی ناشی از ذوب ذرات در ناحیه متأثر از حرارت (HAZ) تنشهای بالاتر همراه با سختی پذیری بیشتر در قطعات متالورژی پودر دیده میشود و میتواند حساسیت مواد به ترک خوردن را نیز بالا ببرد. انبساط گرمایی به طور مستقیم با تخلخل در ارتباط نیست، اما این مشخصه نیز به خودی خود نقش مهمی در تعیین حساسیت ماده به ترک خوردن دارد. تفاوت های احتمالی در ترکیب شیمیایی مواد متالورژی پودر، مواد کار شده یا مواد ریخته گر یسیده منجر میشود که فلزات وقتی گرم و سپس سرد می شوند، تغییرات حجمی متفاوتی از خود نشان دهند

تخلخل ممکن است باعث تغییرات ناخواسته ایی در عملکرد جوشکاری شود، چرا که می توانند به عنوان دامی برای اکسیدها و ناخالصی ها به شمار آیند. اقدامات پیشگیرانه برای حذف هر نوع از موارد زیر باید صورت بگیرد. این مواد میتوانند در حفره ها باقی مانده و مشکل ایجاد کنند. روش های اتصال بیشتر فرایندهای جوشکاری همراه با اعمال حرارت و کنترل ذوب فلز پایه و فلز پرکننده می باشد (حالت ذوب)، در حالیکه سایر روشها با نفوذ سطحی یا و بهم پیوستن مکانیکی ذرات (حالت جامد) انجام میشوند، اما هر دو فرایند جوشکاری حالت جامد و جوشکاری ذوبی با موفقیت بر قطعات متالورژی پودر بکار رفته اند. معمولاً قطعات با چگالی کم کمتر از  $(6/5 \text{ g/cm}^3)$  با فرایندهایی که شامل ذوب فلز جوش و تنشهای انجمادی ناشی از آن نباشد به یکدیگر متصل می شوند. به دلیل تشکیل پیوندهای

ذره ایی کمتر در این محدوده چگالی، استحکام پیوند آن ضعیف بوده و توانایی جذب تنش های بالا که در اثر انقباض فلز جوش تولید می شوند را ندارند. فرایندهای اتصالی که تاکنون با موفقیت بر قطعات کم چگالی انجام شده است، شامل جوشکاری نفوذی، پیوندهای تف جوشی، اتصال چسبنده و لحیم کاری می باشند.

بنا بخاطر اینکه دارای تخلخل زیاد میباشد نمیتوان آنها را با جوشکاری الکتروود دستی جوشکاری کرد و باید از روش های دیگری برای جوشکاری قطعات متالورژی پودر استفاده کرد





## نتایج:

- ۱- یکی از مهم ترین علت های جوشکاری نشدن الکتروود دستی وجود تخلخل در قطعات متالورژی پودر میباشد
- ۱- به دلیل تراکم ذاتی ناشی از ذوب ذرات در ناحیه متأثر از حرارت (HAZ) تنشهای بالاتر همراه با سختی پذیری بیشتر در قطعات متالورژی پودر دیده میشود و میتواند حساسیت مواد به ترک خوردن را نیز بالا ببرد
- ۲- تخلخل ممکن است باعث تغییرات ناخواسته ایی در عملکرد جوشکاری شود، چرا که می توانند به عنوان دامی برای اکسیدها و ناخالصی ها به شمار آیند
- ۳- جوشکاری برجسته مقاومتی (RPW) یکی از پرکاربردترین روش های اتصال برای مواد متالورژی پودر می باشد
- 5- یکی از کاربردهای منحصر به فرد GTA جایگزینی عملیات ریخته گری با جوشکاری دو قطعه متالورژی پودر به یکدیگر برای استفاده در واگنها و وسایل حمل و نقل می باشد تحقیقات نشان داده است که قطعات متالورژی پودر جو شخورده استحکام بالاتر و بهتری نسبت به چدن خاکستری پیچ شده، همراه با ۳۵٪ صرفه جویی اقتصادی نسبت به روش های ساخت پیشین ارائه داده اند





Welding (SMAW) is a process in which a shielded metal electrode is used to transmit current. The current creates an arc in the distance between the tip of the electrode and the workpiece. The electrical resistance is enough heat to melt the base metal and the electrode. Creates. Different welding methods on powder metallurgy parts, cavities act like an insulator that reduces heat transfer, as a result, powder metallurgy parts will have less hardenability than parts worked with the same chemical composition, but due to the inherent density caused by Melting of particles in the heat affected zone (HAZ) with higher stresses along with greater hardness is seen in powder metallurgy parts and can also increase the susceptibility of materials to cracking. Due to the inherent density caused by the melting of particles in the heat-affected zone (HAZ), higher stresses with greater hardness are seen in powder metallurgy parts and can also increase the sensitivity of the material to cracking.

**Keywords:** Powder metallurgy, welding, porosity