دومین کنفرانس ملی مهندسی ساخت و تولید
آبان ۱۳۸۸ دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد

بررسی رابطه ی ریز ساختار و رفتار کششی قطعات تف جوشی شده متالورژی پودر

وحید دهنوی[۱]، ابوالفضل باباخانی[۲]، مصطفی مکارم[۳]
گروه مهندسی مواد و متالورژی ، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نیشابور
vdehnavi@gmail.com

چکیده

خواص کششی و ریز ساختار حفرات قطعات ساخته شده از پودر پیش آلیاژی Fe- 2.86Cr- 0.52 Mo مورد بررسی قرار گرفت و تلاش شد رابطه ی بین ریز ساختار حفرات و خواص کششی بررسی شود. قطعات به دو روش فشردن گرم و فشردن در دمای اتاق تهیه شدند. برای بررسی کمی حفرات از پردازش تصویر استفاده شد. خصوصیات حفرات در هر نوع از نمونه ها بر روی دو مقطع متفاوت مورد ارزیابی قرار گرفت:صفحه‌ی موازی جهت فشارش و صفحه‌ی عمود بر جهت فشارش. با تعریف سه پارامتر فاکتور قطر معادل، فاکتور کشیدگی و فاکتور شکل، خصوصیات حفرات بررسی شد. نتایج حاصل نشانگر رابطه ی مشخصی بین پارامترهای هندسی و مورفولوژیکی حفرات و خواص کششی قطعات می باشد.

واژه های کلیدی: استحکام کششی - فشردن گرم - مدول یانگ - پردازش تصویر- حفرات

۱- مقدمه:

مهمترین معضل موجود در قطعات تولید شده به روش متالورژی پودر غیر همگن بودن و وجود حفرات و تخلخلهای موجود در آنها می‌باشد. این حفرات با کاهش چگالی ظاهری قطعه، کاهش استحکام، کاهش ضربه‌پذیری و به‌ویژه کاهش مقاومت به خستگی را به دنبال دارد. تولید به روش متالورژی پودر بخشی نسبتا کوچک ولی بسیار مهم از صنایع فلزی می‌باشد.[۱] طی دهه‌های اخیر توسعه‌ی پودرهای آهن و فولاد جدید باعث گسترش قابل ملاحظه‌ی کاربرد قطعات متالورژی پودر شده است. لزوم روز افزون تولید موادی با کارایی بالا باعث شده است تا نیاز به فرایندهایی که ایجاد کننده‌ی خواص مکانیکی بهینه به همراه کنترل ابعادی دقیق باشند احساس شود[۲]. چگالی، عناصر آلیاژی و روش آلیاژسازی و شرایط تف‌جوشی تعیین کننده‌ی خواص مکانیکی فولادهای تف جوشی شده هستند. چگالی این نوع قطعات با میزان حفرات موجود در نمونه‌های تولید شده به روش متالورژی پودر نسبت مستقیم دارد. به همین دلیل بررسی پراکندگی و مورفولوژی حفرات در نمونه‌های متالورژی پودر از اهمیت بالایی برخوردار است.[۳ و۴].
حفرات موجود در نمونه‌های متالورژی پودر محل جوانه زنی ترک و بهترین مکان برای رشد ترکها در این نوع قطعات است. تاثیر حفرات بر خواص مکانیکی به هندسه و توزیع آماری آنها در نمونه وابسته است.

۱- مربی، کارشناس ارشد مهندسی مواد
۲- استادیار، گروه مواد و متالورژی دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد
۳- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مواد ، دانشگاه فردوسی مشهد

خصوصیات هندسی شامل شکل، اندازه و میزان کرویت و خصوصیات آماری مانند ارتباط میان حفرات، درصد حفرات و نحوه تجمع آنها در نمونه می‌باشد[۵]. قطعات تف جوشی شده متالورژی پودر معمولا از خود رفتار ترد نشان می دهند و بهمین دلیل چقرمگی آنها در مقایسه با مواد کار شده پایین است. توزیع تصادفی تخلخل، اندازه و شکل آنها بررسی شکست مواد متخلخل را به مساله مشکلی تبدیل می کند.[۶ و ۷]

تحت بارگذاری یکنواخت کششی ، تخلخل سطح مقطع موثر تحت بار را کاهش داده و باعث تمرکز تنش و در نتیجه کاهش استحکام و داکتیلیتی می شود.[۸] با افزایش کسر تخلخل(بیش از ۵ درصد) طبیعت حفرات به سمت به هم پیوستگی حرکت می کند در حالیکه در کسر های پایین تر تخلخل(کمتر از ۵ درصد) که حفرات پراکنده هستند چنین نیست. تخلخل به هم پیوسته باعث افزایش موضعی کرنش در مناطق نسبتا کوچکتر بین ذرات می شود، در حالیکه تخلخل پراکنده باعث تغییر شکل همگن تری می شود. همچنین بعید نیست توزیع تخلخل در نمونه ناهمگن باشد. در این حالت ، کرنش موضعی در محل تجمع تخلخل ها اتفاق می افتد. در نتیجه برای یک مقدار مشخص تخلخل ، حفرات به هم پیوسته در مقایسه با حفرات پراکنده داکتیلیتی ماکروسکپی را به میزان بیشتری کاهش می دهند .[۸]

Christian و German [۸] نشان داده اند که کسر تخلخل، اندازه حفره، شکل آن و فاصله ی بین حفرات همگی فاکتورهای مهمی هستند که رفتار خستگی قطعات متالورژی پودر را کنترل می کنند. بطور کلی حفرات نامنظم تر نسبت به حفرات کاملا کروی تنش بیشتری ایجاد می کنند. [۹]

در این تحقیق تاثیر تخلخل را بر رفتار کششی قطعات متالورژی پودر از جنس فولاد پیش آلیاژی کروم دار بررسی کرده ایم. برای این منظور قطعات به دو روش فشردن در دمای محیط و فشردن گرم که در آن پودر ۱۳۰ و قالب و تجهیزات پرس ۱۵۰ درجه سانتیگراد حرارت داشتند ، تولید شدند. طبق [۱۰] این دما بهترین نتیجه را در این فرایند بوجود می آورد. پس از تف جوشی برای تعیین اندازه، توزیع و شکل حفرات با استفاده از نرم افزار پردازش تصویر ریز ساختار قطعات مورد بررسی قرار گرفت.

۲- مواد و روش آزمایش

در این تحقیق از پودر Astaloy CrM استفاده شد. پودر مورد استفاده حاوی ۲/۸۶ درصد کروم، ۰/۵۲ درصد مولیبدن، ۰/۴۳ درصد گرافیت و مابقی آهن بود که ۰/۵۵ درصد روانساز به آن اضافه شده بود. پودر قبل از فشردن به مدت ۲۰ دقیقه تحت عملیات همگن سازی قرار گرفت. نمونه ها بوسیله ی یک پرس هیدرولیک با ظرفیت ۱۲۰تن در قالبی به شکل نمونه ی استاندارد کشش قطعات متالورژی پودر مطابق استاندارد ASTM E8 فشرده شدند. تمام نمونه ها در فشار ۶۰۰ مگاپاسکال فشرده شدند. سپس نمونه ها در دمای $1120^{\circ}C$ در اتمسفر آمونیاک تجزیه شده به مدت ۴۵ دقیقه تفجوشی شدند.

به منظور بررسی کمی حفرات دو سطح مقطع عمود و موازی جهت فشارش در هر نمونه مورد بررسی قرار گرفت. جدول ۱ کدهای مورد استفاده برای مشخص کردن هر نمونه را نشان می دهد.

جدول ۱- کد گذاری مربوط به نمونه‌ها و مقاطع مختلف

فشردن سرد- مقطع عمود بر جهت فشارش	CC-PR
فشردن سرد- مقطع موازی با جهت فشارش	CC-PL
فشردن گرم- مقطع عمود بر جهت فشارش	WC-PR
فشردن گرم- مقطع موازی با جهت فشارش	WC-PL

برای بررسی خصوصیات حفرات از سه پارامتر استفاده شد: فاکتور قطر معادل، D_{circle} که برابر قطر دایره ای است که مساحتی برابر با سطح مقطع متالوگرافیکی حفره دارد. فاکتور کشیدگی، f_{elong} که نشان دهنده ی میزان کشیدگی حفره است و فاکتور شکل، f_{shape} که بیانگر شکل هندسی حفره و میزان صافی محیط پیرامونی حفره است. مقادیر فاکتور کشیدگی و شکل بین ۰ و ۱ متغیر هستند. فاکتور کشیدگی مستقل از صافی محیط پیرامونی حفره ، برای حفره ای دایره ای شکل ۱ و برای حفرات بیضوی شکل از ۱ کمتر است. فاکتور شکل برای دایره با محیط صاف برابر ۱ است و برای نمونه‌های دایره‌ای شکل با محیط غیر یکنواخت کمتر از ۱ می‌باشد. هر چه این فاکتور به ۱ نزدیکتر باشد نمونه مورد بررسی دارای سطح صاف‌تر و شکل کروی‌تر است. [۱۲ و ۱۳]

۳- نتایج و بحث

در جدول ۲ چگالی و خواص کششی نمونه های آزمایش شده ارائه شده است. همانگونه که مشاهده می شود چگالی نمونه ها در حالت فشردن گرم نسبت به فشردن معمولی در دمای اتاق در فشار یکسان افزایش یافته است. همچنین افزایش چگالی باعث افزایش استحکام کششی و مدول یانگ شده است.

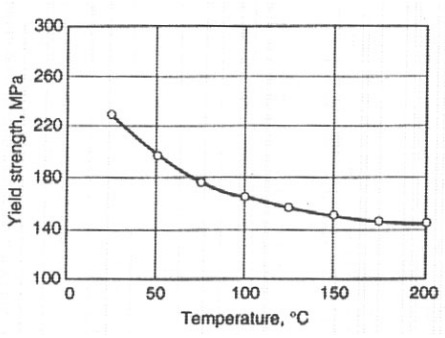
جدول ۲ – چگالی و خواص کششی قطعات تف جوشی شده

نوع فشارش	چگالی پس از تف جوشی gr/cm^3	استحکام کششی (MPa)	مدول یانگ (GPa)
در دمای محیط	۶/۹۶	۶۷۲	۱۰۴/۷
فشردن گرم	۷/۱	۷۳۵	۱۲۹/۲

دلیل افزایش تراکم پذیری و در نتیجه چگالی قطعات را در فشردن گرم می توان به کاهش استحکام فشاری پودر در اثر حرارت نسبت داد. کارهای تجربی درشرکت Hoganas AB نشان دادکه وقتی پودر آهن تا $150^{\circ}C$ حرارت ببیند استحکام تسلیم فشاری آن ۳۰٪ کاهش می یابد. شکل ۱ تأثیر دما بر استحکام تسلیم پودرآهن خالص را نشان می دهد[۱].

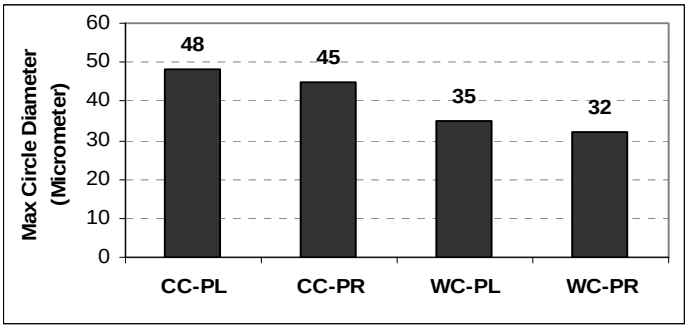
نتایج حاصل از بررسی حفرات در ۴ نوع نمونه نشان داد فاکتور قطر معادل، D_{circle} در نمونه‌های تولید شده با فشردن سرد دارای حفرات با طول ۳ تا ۴۵ میکرون است، درصورتی که نمونه‌های تولید شده به روش فشردن گرم دارای حفراتی با طول ۳ تا ۳۳ میکرون می‌باشند که نشانگر کاهش ۲۵ درصدی ماکزیمم فاکتور قطر معادل در قطعات تولید شده به روش فشردن گرم است. از آنجایی که حفرات به عنوان مراکز ایجاد و رشد ترک عمل می‌کنند، با بزرگ شدن طول آنها کاهش خواص مکانیکی ماده به خصوص مقاومت به خستگی مشاهده می‌شود. با توجه به اینکه طول حفرات با میزان چگالی ماده مرتبط نیست لذا برای ارزیابی آنها بهترین راه، بررسی کمی حفرات می‌باشد. از آنجایی که حفرات با طول ماکزیمم تاثیر بسیار زیادی بر خواص دینامیکی دارند لذا محاسبه و ارزیابی این پارامتر در برآورد خاصیت مکانیکی ماده حائز اهمیت می باشد[۱۴]. شکل ۲ بیشترین قطر معادل در ۴ نمونه را نشان می دهد.

مقایسه‌ی فاکتور کشیدگی f_{elong} در نمونه‌ها نشان می‌دهد به طور کلی حفرات در مقاطع عمود بر نیروی پرس دارای کشیدگی کمتری نسبت به مقاطع موازی نیروی پرس می‌باشد. از طرفی این تفاوت در نمونه ی فشرده گرم به مراتب کمتر از نمونه‌ی تولید شده با پرس سرد می‌باشد. به طور کلی حفرات در نمونه‌های تولید شده با فشردن گرم دارای f_{elong} بیشتر و نزدیکتر به یک می باشند.



شکل ۱- تاثیر دما بر استحکام تسلیم پودرآهن خالص[۱]

از طرفی در فشردن گرم تفاوت در فاکتور کشیدگی در مقاطع مختلف کمتر از نمونه‌ی فشرده شده به روش سرد است. شکل ۳ میزان تجمعی پارامتر کشیدگی f_{elong} در حفرات دارای فاکتور کشیدگی ۰/۳ تا ۰/۳۵ را نشان می‌دهد. دلیل انتخاب این بازه تاثیر بیشتر حفرات با فاکتور کشیدگی کمتر بر خواص ماده می‌باشد. همچنین معیار مناسبی برای مقایسه‌ی اختلاف در سطح مقاطع مختلف می‌باشد.

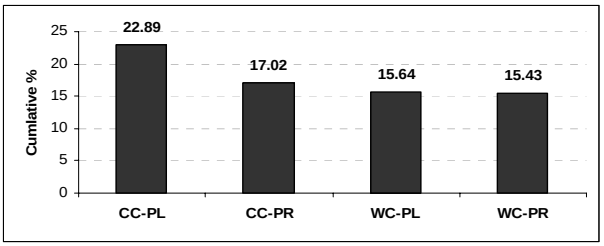


شکل ۲- بیشترین قطر معادل D_{circle} (میکرون) در نمونه‌ها

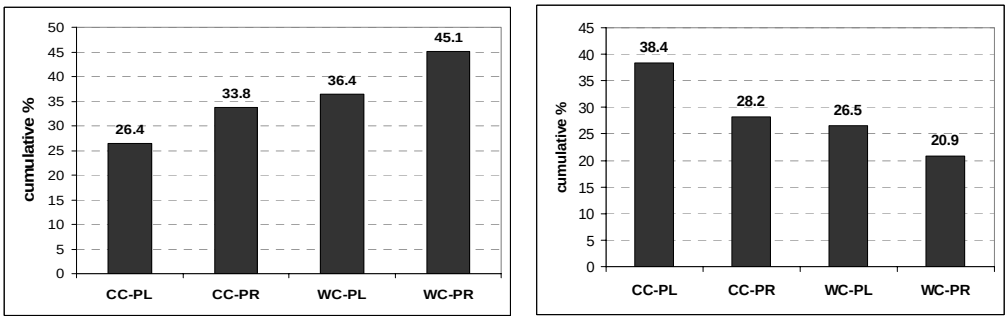
مقایسه فاکتور شکل f_{shape} در نمونه‌ها نشان می‌دهد درصد تجمع حفرات با فاکتورشکل نزدیک به یک در نمونه‌های فشرده شده به‌روش فشردن گرم بیشتر از حفرات موجود در نمونه فشرده شده در قالب سرد می‌باشد (شکل۴-a). همچنین با مقایسه حفرات با فاکتور شکل پایینتر از ۰/۴ مشاهده می شود تجمع این حفرات در نمونه‌ی تولید شده به روش فشردن سرد بیشتر می‌باشد(شکل۴-b). ضمنا فاکتور شکل حفرات ارزیابی شده در مقاطع موازی با نیروی پرس به سمت ۱ تجمع بیشتری داشته که نشان از کروی‌تر بودن آنها می‌باشد.

بر اساس این نتایج در نمونه‌های تهیه شده با فشردن گرم علاوه بر کروی شکل بودن بیشتر حفرات ، یکنواختی بیشتری در مقاطع مختلف دیده می‌شود. دلیل این امر را می توان چنین توضیح داد. پودر در حال فشار تحت دو نوع تنش قرار دارد: تنش محوری، σ_a، در راستای جهت اعمال فشار و تنش شعاعی، σ_r ، که عمود بر دیواره های قالب است. در بارگذاری پلاستیک رابطه ی این دو تنش به صورت زیر است، که در آن σ_0 تنش تسلیم خشته تحت فشار است.

$$\sigma_r = \sigma_a - \sigma_0 \qquad (۱)$$



شکل ۳- نمودار تجمعی پارامتر کشیدگی f_{elong} برای حفرات با کشیدگی ۰/۳تا ۰/۳۵



(a) **(b)**

شکل ۴- نمودار تجمعی پارامتر شکل، f_{shape} ، a- درصد حفرات با فاکتور شکل بیشتر از ۰/۷ b- درصد حفرات با فاکتور شکل کمتر از ۰/۴

مشاهده می شود با کاهش تنش تسلیم، تنش شعاعی افزایش می یابد. افزایش دما باعث کاهش استحکام تسلیم و در نتیجه افزایش تنش شعاعی در نمونه های تولید شده توسط فشردن گرم می شود. افزایش تنش شعاعی باعث یکنواخت تر شدن تنش در جهات مختلف قالب و به‌دست آمدن نمونه‌ای با حفرات یکنواخت‌تر و کروی تر می‌شود[۱۴]. در بارگذاری کششی حفرات غیر یکنواخت تر تمرکز تنش بیشتری ایجادکرده و احتمال اینکه به عنوان محل شروع ترک عمل کنند بیشتر است[۸].

عموما برای تخمین استحکام خستگی قطعات متالورژی پودر با استفاده از استحکام کششی از نسبت $(\sigma_{fat}/\sigma_{uts})$ استفاده می شود. در قطعات متالورژی پودر معمولا این نسبت بین ۰/۳ و ۰/۴ است که در مقایسه با فولادهای کار شده که نسبتی برابر ۰/۴ تا ۰/۵ دارند کمتر است. اما استفاده از استحکام کششی برای تخمین استحکام خستگی روش مناسبی نیست زیرا استحکام کششی معیاری از آسیب ماکروسکپی در مقیاس بزرگ است که در تنش های اعمالی یا کرنش های پلاستیک نسبتا بالا اتفاق می افتد. از طرفی آسیب خستگی پیچیده تر بوده و در تنش های به مراتب کمتر بوسیله ی پلاستیسیته موضعی در عیوب داخل مواد اتفاق می افتد. در نتیجه مدول یانگ معیار مناسب تری برای تخمین استحکام خستگی مواد ناهمگن مثل قطعات متخلخل است، چون برای یک تنش مشخص، افزایش مدول یانگ باعث کاهش کرنش اعمالی می شود. کرنش ماکروسکپی اعمالی کمتر باعث بوجود آمدن کرنش موضعی پایین تری شده که بالطبع باید آسیب خستگی را کاهش داده و عمر خستگی را افزایش دهد. [۸] با توجه به مقادیر مدول یانگ نمونه ها در جدول ۱ انتظار می رود استحکام خستگی نمونه های فشرده شده گرم نسبت به نمونه های معمولی بالاتر باشد.

بطور کلی استحکام و مدول یانگ بالاتر قطعات تولید شده به روش فشردن گرم را می توان به افزایش چگالی ناشی از بیشتربودن تراکم پذیری پودرهای حرارت دیده، کرویت و صافی محیطی بیشتر تخلخل ها، کاهش کشیدگی تخلخل ها و یکنواختی بیشتر شکل هندسی حفرات در مقاطع مختلف نسبت داد.

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق تاثیر تخلخل بر رفتار مکانیکی قطعات تف جوشی شده متالورژی پودر بررسی شد. بر اساس یافته های تحقیق می توان چنین نتیجه گرفت:

- فشردن گرم باعث افزایش چگالی ، استحکام و مدول یانگ در فشار یکسان نسبت به فشردن در دمای اتاق می شود.
- افزایش سطح موثر تحت بار به دلیل کاهش تخلخل و همچنین بهبود خصوصیات هندسی حفرات از عوامل افزایش استحکام کششی و مدول یانگ در قطعات متالورژی پودر است.
- با بررسی پارامتر بیشترین قطر دایره معادل حفرات (D_{circle}) مشاهده شد قطر معادل حفرات در نمونه‌های تولید شده به روش فشردن گرم کمتر از نمونه تولید شده به روش فشردن سرد است که این تفاوت به ۲۵٪ می‌رسد.
- مقایسه فاکتور کشیدگی نشان داد قطعات فشرده شده در دمای بالا نسبت به قطعات معمولی دارای حفراتی با شکل

بدینوسیله گواهی می گردد مقاله با عنوان

بررسی رابطه ی ریز ساختار و رفتار کششی قطعات تف جوشی شده

نگارش شده توسط

وحید دهنوی- ابوالفضل باباخانی- مصطفی مکارم

در دومین کنفرانس مهندسی ساخت وتولید دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد مورد پذیرش نهایی قرار گرفت و در تاریخ ۶ و ۷ آبان ماه ۱۳۸۸ به جامعه ساخت و تولید ایران ارائه گردیده است.

دکتر رضا ابراهیمی
معاون پژوهشی دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد